Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 9/07 SEPTEMBER 2007

HIRNFORSCHUNG
Neuro-Implantate für ein besseres Gehirn?

ASTRONOMIE
Satellitengalaxien der Milchstraße

KREBS-SERIE (TEIL I)
Warum Krebs nicht ausgestorben ist

KLIMAWANDEL

Warum Hurrikane stärker werden

7,40 € (D/A) · 14,– sFr / Luxemburg 8,– €
D6179E

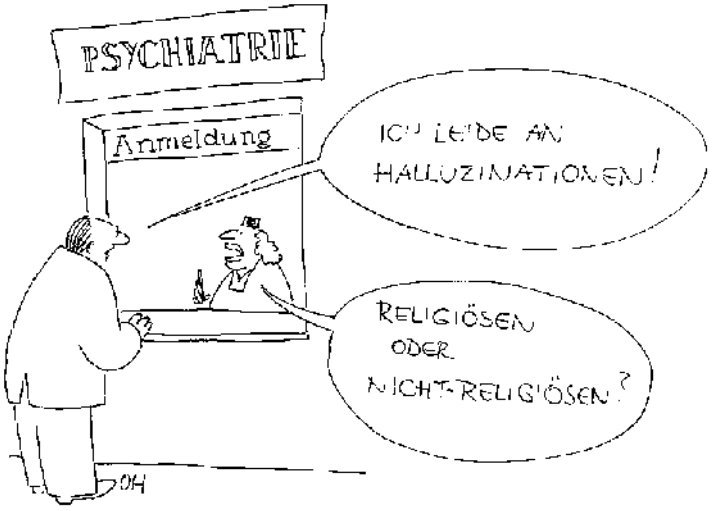
Reinhard Breuer
Chefredakteur

Endlich ein besseres Hirn?

Wollten Sie schon mal so klug sein wie Einstein? Würden Sie nicht auch gerne als Künstler oder Schriftsteller glänzen? Hätten Sie nicht gerne endlich ein unfehlbares Gedächtnis? Nach den Vorstellungen mancher Forscher kann Ihnen demnächst geholfen werden. Hirnverbesserung heißt das Rezept, auf Englisch *neuroenhancement*. Mit den neuen Möglichkeiten von Pharmakologie bis zu Neuroimplantaten hoffen nicht wenige, ihre angeborenen Hirnleistungen aufbessern und ihren Intelligenzquotienten steigern zu können. Man muss kein Fantast sein, um sich vorzustellen, dass dann besorgte Eltern ihren Kindern bessere Aufstiegschancen verschaffen wollen, indem sie diese vielleicht schon im Vorschulalter mit hirnverbessernden Maßnahmen »behandeln« lassen. Hier stellen sich auch ethische Fragen, die bisher noch gar nicht ausgelotet sind. Wer weiß schon genau, was eine »Verbesserung« unserer Hirnleistung bedeutet und bewirkt? Der Technikethiker Armin Grundwald, den wir befragt haben, meint jedenfalls dazu: »Ich sehe kein technisches K.-o.-Argument, um diese Entwicklungen zu verhindern« (S. 46).

Doch noch ist es nicht so weit – und deshalb ist das, was die Wissenschaftsautorin Tanja Krämer über das Thema zusammengetragen hat, hauptsächlich auf die Therapie schwerer Krankheiten ausgerichtet. Wer an Parkinson, Epilepsie oder Zwangsneurosen leidet, wird vermutlich froh sein, wenn die Medizin hier erfolgreich intervenieren kann, auch wenn es um etwas so Persönliches wie das eigene Gehirn geht (S. 42).

Meine Kollegen bei unserem Mutterblatt Scientific American haben mich immer beneidet, dass wir in Deutschland bisher kaum vom so genannten Kreationismus beziehungsweise Intelligent Design angesteckt waren. Diesbezügliche Äußerungen vom Wiener Kardinal Schönborn oder von Thüringens Ministerpräsident Dieter Althaus vor geraumer Zeit wirkten wie Ausrutscher, die bald wieder vergessen waren. Doch in letzter Zeit scheint sich das Blatt zu wenden, und ich kann meinen Freunden

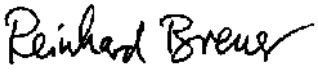


über dem Teich heute nur ein bedauerndes »Wir jetzt auch« übermitteln.

Dass die Kultusministerin des Bundeslandes Hessen ohne Konsequenzen öffentlich fordern kann, im Biologieunterricht solle neben der Evolutionstheorie auch die biblische Schöpfungsgeschichte gelehrt werden, ist schon atemberaubend. Doch eine Schädigung der Wissenschaft erwarte ich davon eher nicht, genauso wenig, »wie die allenthalben in den Medien florierende Astrologie der Kosmophysik Schaden zufügt« (Hubert Markl). Zwei eminente Forscher diskutieren diese Abgrenzungsproblematik ab S. 102: der amerikanische Physiker Lawrence M. Krauss sowie der britische Evolutionsbiologe Richard Dawkins.

Wohlgemerkt: Die beiden führen hier kein Streitgespräch. Denn beide sind erklärte Gegner jeder Pseudowissenschaft. Doch bringen sie in der Debatte jeweils auch ihre ganz persönliche Haltung zum Ausdruck, wie ein moderner Wissenschaftler mit Glauben und Aberglauben umgehen kann.

Herzlich Ihr



PS: Diesmal haben Sie wieder Gelegenheit, über Ihren **Wunschartikel** abzustimmen. Die Themen stehen auf S. 6.

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Rülpsender Vulkan · Einfühlsamer Computer · Geysire auf Plutomond · Energiesparmodell Zweibeiner u. a.

13 **Bild des Monats**
Fresszellen in Aktion

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Moderne Mathematik in islamischen Ornamenten**
Mittelalterliche Künstler nutzten Selbstähnlichkeit und Quasiperiodizität

17 **Computer knobeln an Stasi-Puzzle**
Millionen Papierschnipsel der Stasi sollen per Software wieder zusammengesetzt werden

19 **Monte Carlo in der Membran**
Zwei deutschen Jungforschern gelingt Simulation der Proteinfaltung

22 **Beredter Mörtel**
Mineralogen analysieren alte Baustoffe in historischen Bauwerken

THEMEN

26 PALÄONTOLOGIE
Die Evolution der Säugetiere Südamerikas

▶ **34** TITELTHEMA KLIMAWANDEL
Globale Erwärmung steigert Zerstörungskraft der Hurrikane

▶ **42** NEUROIMPLANTATE
Gesteuertes Gehirn – gesteuerter Geist?

▶ **52** GALAXIEN
Die Schatten galaktischer Welten

64 STAMMBÄUME
Ahnensuche in den Genen

74 ROBOTIK
Haushaltshilfe durch Ballbots?

▶ **80** KREBS-SERIE TEIL I: EVOLUTION
Warum unser Schicksal mit dieser Krankheit verzahnt ist

88 KOSMOLOGIE
Galaxienflucht oder Expansion?

102 ESSAY
Religion versus Wissenschaft

SEITE 26

SÄUGETIERE

Es war einmal in Südamerika

In uraltem Vulkangestein eingeschlossene Fossilien schließen eine Lücke in der Evolutionsgeschichte des Kontinents

SEITE 42

NEUROIMPLANTATE

Auf Knopfdruck kreativer oder glücklicher?

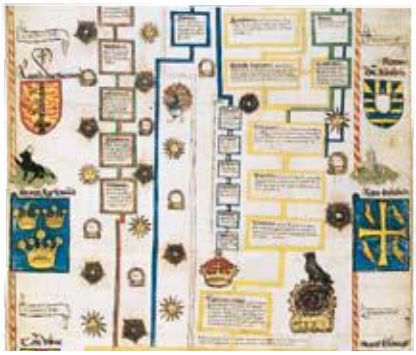
Noch mühen sich Mediziner, mit Hirnimplantaten Schwerkranken zu helfen – schon verkünden Visionäre den Beginn einer neuen Ära: die technische Aufrüstung des Gehirns

SEITE 52

STERNSTRÖME

Die Schatten galaktischer Welten

In Schönheit sterben: Die kleinen Nachbargalaxien der Milchstraße werden von deren Gezeitenkräften zu langen Sternströmen deformiert



SEITE 64

WUNSCHARTIKEL: STAMMBÄUME

Ahnenforschung per Genetik

Genforscher können Verwandtschaftsbeziehungen unter Menschen über Jahrtausende zurückverfolgen

SEITE 74

ROBOTIK

Rollen mit Ballbots

Ob in Haushalt oder Pflege – auch Roboter auf Kugeln könnten einmal dem Menschen zur Hand gehen

TITELTHEMA KLIMAWANDEL **SEITE 34**

Mehr Monsterstürme

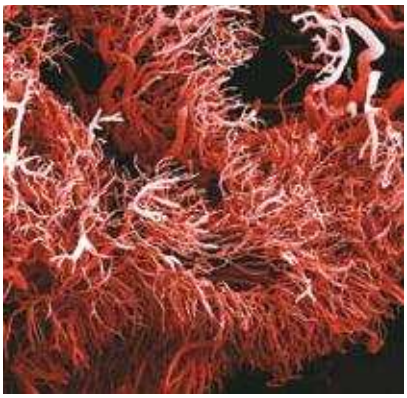
Mit steigenden Meerestemperaturen hat auch die Gewalt der Hurrikane zugenommen. Computersimulationen zeigen: Dieser verhängnisvolle Trend wird sich fortsetzen

SEITE 80

SERIE TEIL I: KREBS

Krebs – Nebenwirkung der Evolution

Selektionskräfte liefern nur mäßig wirksame Waffen gegen Krebs. Die Krankheit macht sich sogar einige evolutionäre Neuerungen zu Nutze

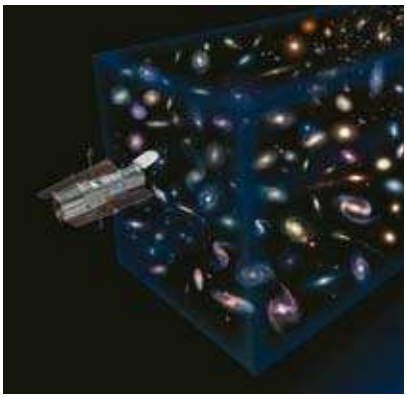


SEITE 88

KOSMOLOGIE

Expansion oder Galaxienflucht?

Ein alter Streitpunkt der Kosmologie: Entfernen sich die Welteninseln von uns oder dehnt sich das All aus?



KOMMENTAR

25 SPRINGERS EINWÜRFE
Die Macht fremder Blicke

WISSENSCHAFT IM ...

50 **Alltag:** Rasterfahndung in der Pixelmatrix – die Texterkennung

63 **Rückblick:** Rundum-Röntgen der Zähne · Intelligentes Leben auf dem Mars · Gletscherschmelze als Klimaindiz? u. a.

REZENSIONEN

92 **Phänomen Honigbiene** von Jürgen Tautz
I Am a Strange Loop von Douglas R. Hofstadter
Die Chaos-Zellen von Manfred Reitz
Reiseskizzen aus Malaya von Friedrich Leibenguth

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

98 **Optimale Schäume**
Eine Vermutung von Lord Kelvin wurde nach 107 Jahren widerlegt

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Endlich ein besseres Hirn?

8 **Leserbriefe**

9 **Impressum**

106 **Vorschau**

Titelmotiv: Hurrikan Linda über Baja California, 12. 09. 1997
Titelillustration: Nasa/GSFC-RSD, Bearbeitung: Marit Jentoft-Nilsen

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Das Ergebnis der vierten Runde:

Stammbäume (siehe S. 64) 43,3 %

Nanotubes im Netzverbund 31,3 %

Flüssige Teleskopspiegel 31,0 %

Geheimkontrolle für Gene 28,3 %

Rückbau von Staudämmen 26,3 %

Da Mehrfachnennungen möglich waren, addieren sich die Prozentzahlen zu mehr als 100 %.

LESERUMFRAGE

Wunschartikel, die fünfte Runde

Zur Auswahl für das Dezemberheft 2007 stehen diesmal folgende Themen:

- **Waldbrände** Simulationen unterstützen Bekämpfung und Vorbeugung
- **Datennetze aus Licht** WLAN über die Deckenleuchte statt über die Funkverbindung ermöglicht störungsfreie Übertragung
- **Schneekristalle** In den Laboren wachsen bereits Designer-Kristalle
- **Autoimmunkrankheiten** Antikörper im Blut dienen als Frühindikatoren – lange vor dem Ausbruch
- **Der Stammbaum der Katzen,** rekonstruiert mit Methoden der Humangenomforschung

Stimmen Sie ab unter www.spektrum.de/wunschartikel

◀ WISSENSCHAFT IN DIE SCHULEN

wis wissenschaft in die schulen!

Physikalische Experimente in die Schulen

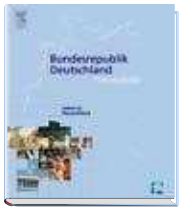
Im Rahmen der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!« stellen wir die legendäre Rubrik »Experiment des Monats« von Jearl Walker (1978 bis 1990) online, versehen mit Erläuterungen und didaktischen Hinweisen, die den Gebrauch des Materials in der Schule erleichtern

www.wissenschaft-schulen.de

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt

	1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	24

◀ REZENSION

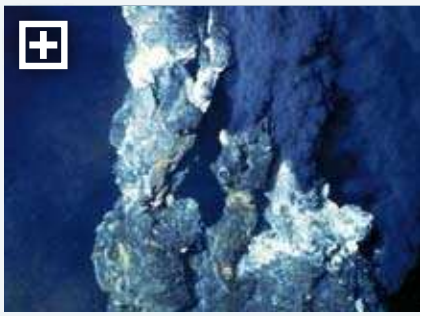


Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Band 12: Leben in Deutschland

Wer beim Wort »Atlas« nur an Schule und das langweilige Brüten über Karten denkt, kann eines Besseren belehrt werden: Der Schlussband des zwölfteiligen Werks bietet Information, über die man in dieser Form wohl (noch) nie nachgedacht hat!

Aus der Rezension von Daniel C. Dreesmann

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/5x5



◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Mikroben im siedenden Wasser

Sie tragen Namen wie Feuerlappen, Feuernetz oder reitender Urzwerg und gedeihen am besten unter wahrhaft höllischen Bedingungen. Die Jagd nach Hochtemperaturmikroben fördert noch immer Überraschendes zu Tage

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

PUBLIKATIONEN

zu Themen
in diesem Heft

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 34

WIRBELSTÜRME

Hurrikane an der Leine

Im Computer gelingt es schon, tropische Wirbelstürme abzuschwächen oder abzulenken. Die Simulationen zeigen, welche Eingriffe auch in der Realität Erfolg versprechen könnten

Kostenlose Leseprobe unter www.spektrum.de/artikel/837416

SDW DOSSIER 1/2007
Naturgewalten

Bessere Vorhersage von Tsunamis

Bedrohung durch stille Erdbeben

Ascheregen über ganzen Kontinenten

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 42

NEUROTECHNOLOGIE

Magnetische Hirnstimulation

Depressionen lindern, Müdigkeit vertreiben, das Denkvermögen steigern – all dies soll die Aktivierung des Gehirns mit pulsierenden Magnetfeldern bewirken

SDW SPEZIAL 3/2004
Das verbesserte Gehirn

Pfiffiger per Pille?

Maschinen, die Gedanken lesen

Hirn, reparier dich selbst

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 52

GAIA-MISSION

Die Kartierung unserer Galaxis

Im Jahr 2011 soll das Weltraumteleskop Gaia auf die Reise gehen, eine Milliarde Sterne vermessen und die genaueste Karte des Milchstraßensystems liefern

Kostenlose Leseprobe unter www.astronomie-heute.de/artikel/835908

ASTRONOMIE HEUTE 5/2006
Kontakt!

Teleskope in der Wüste

Leben im Sternbild Krebs?

Fotografieren im Orbit

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 102

RELIGION UND WISSENSCHAFT

»Das wäre die Abschaffung des Menschen«

Beschert uns die Hirnforschung mit einem neuen naturalistischen Menschenbild das Ende der Religion?

G&G 7-8/2006
Angriff auf den Glauben

Genie und Wahnsinn

Schlaf: Nächtliches Solo

Akustische Hallizunationen

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-743

Quantenradierer in Schulen

Quantenradierer selbst gemacht
Juli 2007

Es ist äußerst erfreulich, dass Spektrum der Wissenschaft interessante, motivierende Experimente vorstellt, die der interessierte Laie, aber auch der Lehrende an Schulen und Hochschulen selbst nachzubauen vermag und auf diese Weise anderen Menschen die Faszination der Naturgesetze näherbringen kann.

Im Fall des Quantenradierers möchte ich aber darauf hinweisen, dass ein solches Experiment mit Laserpointer und Polarisationsfolien seit 2002 im Buch von Küblbeck und Müller beim Aulis Verlag veröffentlicht ist.

Auf der Internetseite www.quantenphysik-schule.de findet sich seit dem Jahr 2003 eine detaillierte und bebilderte Bauanleitung, die gegenüber dem Vorschlag in Spektrum meines Erachtens einige Vorteile bietet: So wird an Stelle des Drahts ein richtiger Doppelspalt aus Rasierklingen verwendet und die Polarisationsfolien sind drehbar angebracht, sodass man jeden Winkel zwischen 0 und 90 Grad einstellen kann. Das Ganze wird auf der Hülle einer VHS-Kassette stabil montiert. Damit lässt sich ein Experiment modellhaft nachspielen, von dem Richard Feynman behauptet, dass es das ganze Geheimnis der Quantenmechanik enthält. Sogar im Abitur von Baden-Württemberg war der Doppelspalt mit Polarisationsfolien dieses Jahr ein Thema. Man sieht also, wir in Deutschland sind durchaus auf der Höhe der Zeit, und das sogar in der Schule.

Wolf-Peter Hirlinger, Heidenheim

MATT COLLINS

Schon mit einfachem Material können Sie ein Experiment ausführen, das das Geheimnis der Quantenmechanik enthält.

Fortschritt und Ansporn zu weiterer Erkenntnis

Die Pein der Verlegenheit, Mai 2007

Es lässt sich durchaus begründen, dass »wissenschaftliches Denken« mit der Erkenntnis von Verlegenheit (griechisch: Aporie) begann.

Die sokratische Methode der »Überführung« (Elenktik) von sicherer Gewissheit in eine peinliche Unwissenheit steht zumindest als hervorragendes Ereignis zu Beginn der Wissenschaften. Ihr Urheber Sokrates musste etwa im Jahr 399 v. Chr. diese unangenehme Gesprächstechnik vor Gericht verteidigen. Dies tat er mit dem Verweis auf einen göttlichen Auftrag, die Nichtwissenheit der Menschen in Verlegenheit erkennbar zu machen. Erst durch diese Verlegenheit gelingt es, weiteres Wissen zu erzeugen beziehungsweise zu »gebären« (Mäeutik).

Die Verlegenheit ist damit sowohl ein erster Fortschritt bei der Erkenntnis als auch der Ansporn zu weiterer Erkenntnis. Wenn man überlegt, wie Wissenschaft entsteht, dann scheint kein Weg an der Verlegenheit des Unwissens vorbeizugehen.

Oder, wie es Meister Kong alias Konfuzius in der gleichen Epoche formulierte: »Wenn du weißt, was du weißt, und du weißt, was du nicht weißt: Das ist Wissen!«

Prof. Dr. Karsten Löhr, Ulm

Turiner Grabtuch

Johannas falsche Knochen
Leserbriefe, August 2007

Bei der Radiokarbondatierung des Turiner Grabtuchs handelt es sich mitnichten um eine »Fehlmessung«, schon gar nicht verursacht durch Verunreinigungen. Selbstverständlich wurden die Stoffproben vor der Datierung gereinigt *(Nature, Bd. 337, 1989, S. 612 f.)*. Ungereinigte Proben zu datieren wäre eine Stümperei, die sich ganz sicher nicht die Wissenschaftler dreier Datierungslabors (Oxford, Zürich, Tucson) gleichzeitig zuschulden hätten kommen lassen. Es dürfte wohl kaum ein Zufall sein, dass das Datierungsergebnis zeitlich mit dem ersten Auftauchen des Tuchs in Lirey um 1350 zusammenfällt.

Zum Abbild auf dem Tuch sei gesagt, dass es sich keinesfalls um einen »nicht erklärbaren ›Negativabdruck‹« handelt. Abgesehen davon, dass das Bild kein Negativ im fotografischen Sinn ist, wie häufig behauptet wird, ist es bereits rund zehn Jahre vor der Radiokarbondatierung als Gemälde identifziert worden: Es besteht aus damals üblichen Eisenocker- und Zinnober-Farbpigmenten in einem Eiweiß-Bindemittel.

Mit dem Turiner Grabtuch verhält es sich also nicht anders als mit (vermutlich) allen Reliquien: Es handelt sich nachweislich um eine Fälschung, was jedoch Gläubige nicht daran hindert, ungeachtet der Fakten an der Echtheit festzuhalten.

Dr. Jürgen Clade, Würzburg

Programmiersprache bildet Fundament

Der Strichpunkt-Krieg
Essay, Juni 2007

Für die Zuverlässigkeit kritischer Software, beispielsweise für den sicheren Betrieb eines Passagierflugzeugs oder für die Steuerung eines Kernkraftwerks, bildet die bei der Konstruktion dieser Software verwendete Programmiersprache das entscheidende Fundament.

Eine solche Programmiersprache muss sowohl den Programmierer bestmöglich vor unbeabsichtigten eigenen Fehlern bewahren als auch die Qualitätssicherung wirkungsvoll unterstützen: Dabei geht es darum, verbleibende Fehler – das können auch böswillig verursachte sein – rasch und mit hoher Sicherheit zu erkennen sowie sicherzustellen, dass das Endprodukt exakt den Spezifikationen entspricht.

Derartige Anforderungen erfüllen gewiss nicht alle Programmiersprachen. Bei den meisten der von Herrn Hayes erwähnten Sprachen waren sie vermutlich

auch kein Designkriterium. Das waren sie aber explizit bei der Sprache Ada, die der Autor nur kurz und in eher unfreundlichem Kontext erwähnt.

Ada ist sicher nicht die einzige Programmiersprache, die für kritische Software geeignet ist. Mit entsprechender Programmierdisziplin, deren Einhaltung allerdings durch strenge Kontrolle sichergestellt werden muss, können auch etliche andere Programmiersprachen eingesetzt werden. Bei Ada wird diese erforderliche Programmierdisziplin aber bereits weit gehend durch die Sprache selbst erzwungen, Kontrolle ist insofern also nicht erforderlich. Naturgemäß ist daher Programmieren in Ada kein Freizeitvergnügen.

Roland Schmitt, Münster

Auch Eichelhäher sind nicht ohne

Intelligenztests für Kolkraben
Juli 2007

Die Beobachtung, dass Raben an Schnüren aufgehängte Fleischstücke heraufholen, indem sie sich mit einem Fuß auf die bereits eingeholte Leine stellen, lässt sich auch bei anderen Vögeln machen.

So habe ich im Winter in meinem Garten beobachtet, dass Eichelhäher *(Garrulus glandarius)*, die auch zu den Corvidae gehören, Meisenknödel, die an Schnüren aufgehängt waren, auf die gleiche Weise erbeuten.

Dr. Harry Knitter, Kulmbach

Primärquellen sagen anderes

Wellness in der Antike, Juli 2007

Entgegen Herrn Kissel wurde die Gemeinde Kyme im Jahr 338 v. Chr. keinesfalls unter dem Namen Cumae zu einer römischen Kolonie, sondern lediglich eine *civitas sine suffragio*, sie besaß also passives römisches Bürgerrecht.

Im Jahr 178 v. Chr. gab es keinen Konsul mit dem Namen Gnaeus Cornelius, sondern die beiden Konsuln dieses Jahres trugen die Namen Marcus Iunius Brutus und Aulus Manlius Vulso. Einen Konsul Gnaeus Cornelius (ergänze Scipio Hispallus) gab es erst im Jahr 176. Dieser sucht das Bad aber nicht wegen seines Rheumas auf, sondern weil er nach einem Sturz eine Infektion auskurieren wollte. Ihm hat aber der Aufenthalt bei den Aquae Cumanae nicht viel geholfen, denn er ist anschließend in Cumae verstorben.

Xerxes war erst seit Herbst 486 Großkönig, da bis zu diesem Zeitpunkt sein Vater Dareios das Perserreich regierte. Die persische Flotte, die im Jahr 490 Griechenland angriff, fuhr quer über die Ägäis (Einnahme der Insel Delos) und zog sich im Herbst nach der Niederlage der Landungstruppen bei Marathon wieder auf diesem Weg nach Kleinasien zurück. Die Route entlang der Küste Nordgriechenlands, die die persische Flotte unter Mardonios im Jahr 492 genommen hatte, wobei sie im Sturm am Athos etwa 300 Schiffe verlor, wurde erst wieder im Jahr 480 genommen. Der inzwischen auch archäologisch nachgewiesene Kanalbau am Athos begann im Sommer 483 und war kurz vor dem Erscheinen der persischen Truppen in Nordgriechenland im Sommer 480 abgeschlossen. Die Ingenieure, die das Unternehmen leiteten, stammten übrigens aus Phönizien.

Prof. Peter Herz, Regensburg

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Erratum

Sauber, aber nicht rein
Nachgehakt, Juli 2007

Es ist der Gehalt von Uran insgesamt, der in abbauwürdigen Erzen zwischen 0,1 und 20 Prozent liegt. Das Isotop Uran-235 hat daran nur einen Anteil von 0,7 Prozent. Die Red.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Peter John, Dr. Rainer Kayser, Thomas Mädler, Claus-Peter Sesín, Dr. Sven Titz, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.
Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an.
Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

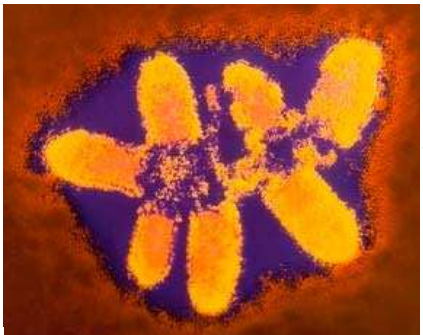
SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

MEDIZIN

Mit Tollwutpeptid ins Gehirn



AG. FOCUS / SPL, EM UNIT, CVL WEYBRIDGE

Das Tollwutvirus – hier eine angefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme – liefert einen Schlüssel, um Medikamenten Zugang zum Gehirn zu verschaffen.

■ Erkrankungen des Zentralnervensystems gehören nach wie vor zu den größten Herausforderungen für die Medizin; der Grund ist die Blut-Hirn-Schranke, eine besondere Zellschicht in den Blutgefäßen des Gehirns, die nur ausgewählten Molekülen Einlass gewährt und die meisten Medikamente zurückhält.

Ausgeschlossen bleibt auch der aussichtsreichste Neuzugang im Methodenarsenal der Mediziner: die siRNA. Diese kurzen Kettenmoleküle können gezielt Gene unterdrücken, indem sie deren Übersetzung in Proteine blockieren. Mediziner hoffen, mit ihnen auch neurodegenerative Erkrankungen wie die Alzheimer-Demenz behandeln zu können. Allerdings müsste es dazu gelingen, die siRNA durch die Blut-Hirn-Schranke ins Zentralnervensystem zu schleusen.

Einen möglichen Weg fand jetzt ein Team um Priti Kumar von der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts). Tollwutviren, die spezifisch Nervenzellen befallen, tragen an ihrer Oberfläche ein Protein namens RVG, mit dem sie ins Gehirn eindringen können. Kumar und seine Kollegen stellten ein verwandtes Peptid künstlich her und koppelten es an siRNA. Tatsächlich gelangte diese daraufhin aus der Blutbahn ins Gehirn. Zudem überlebten Mäuse eine Infektion mit dem normalerweise tödlichen Japan-B-Enzephalitis-Virus (JEV), wenn sie eine intravenöse Injektion von Anti-JEV-siRNA mit angehängtem RVG-Peptid erhielten. Als Nächstes bleibt zu klären, ob der Kunstgriff auch beim Menschen funktioniert. *Nature, Bd. 448, S. 39*

ENERGIETECHNIK

Spiegelnde Sonnenfänger

■ Der Solarenergie gehört die Zukunft, ist sie doch unerschöpflich und emissionsfrei. Von ihrem Vormarsch zeugt eine wachsende Zahl an Hausdächern mit Fotovoltaikzellen oder Sonnenabsorbern. In sonnigen Ländern kommt aber auch der Bau großer solarthermischer Kraftwerke in Frage. Bei den wenigen bisher realisierten Anlagen fokussieren riesige Parabolspiegel das Sonnenlicht auf ein zentrales Absorberrohr.

Nun wird in Almería, der Stadt mit den meisten Sonnenstunden Spaniens, eine preisgünstigere Alternative getestet, die zudem Platz sparender und unempfindlicher gegen Wind ist. Beteiligt sind das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, die DLR und die MAN Ferrostaal Power Industry GmbH.

Die im Juli eingeweihte Demonstrationsanlage arbeitet mit einem so genannten Fresnel-Kollektor. Darin lenken Reihen von langen, flachen Spiegeln das Sonnenlicht über einen Zweitspiegel auf ein direkt darüber verlaufendes Rohr und verwandeln dort Wasser in bis zu 450 Grad Celsius heißen Dampf. Dieser treibt eine Turbine an und erzeugt so Strom. Der Fresnel-Kollektor in Almería ist hundert Meter lang. Sollte er den Praxistest bestehen, wäre der Weg frei für den Bau der ersten kommerziellen Anlage nach diesem Prinzip.

Pressemitteilung der Fraunhofer-Gesellschaft

ARCHÄOLOGIE

Beutegut der Nordmänner

■ Der größte und eindrucksvollste Wikingerschatz, der seit mehr als 150 Jahren in Großbritannien zum Vorschein kam, wurde jetzt in London der Öffentlichkeit präsentiert. Er umfasst unter anderem einen reich verzierten, vergoldeten Silberbecher, den die gefürchteten Nordmänner wahrscheinlich bei einem Raubzug in einem französischen Kloster erbeuteten, einen goldenen Armreif und über 600 Silbermünzen. Experten taxieren seinen Wert auf eine Million britische Pfund – umgerechnet 1,5 Millionen Euro.

Der Hort befand sich in einem bleiernen Behälter, den der Schatzsucher David Whelan und sein Sohn Andrew schon Anfang des Jahres bei einer Erkundungstour mit Metalldetektoren in der Nähe der nordenglischen Stadt Harrogate entdeckt hatten. Münzen aus dem arabischen Raum sowie aus dem heutigen Russland und Afghanistan demonstrieren die weit reichenden Kontakte der Wikinger. Daneben finden sich Geldstücke aus dem christianisierten wie auch dem heidnischen Skandinavien. Forscher vermuten, dass der Schatz vergraben wurde, als der angelsächsische König Athelstan im Jahr 927 das Wikingerreich Northumbria eroberte.

Den Entdeckern der wertvollen Altertümer und dem Besitzer des Grundstücks, auf dem sie versteckt waren, steht nun die Hälfte des Verkaufserlöses zu. Das British Museum in London hat bereits großes Interesse bekundet.

Pressemitteilung des British Museum

Der neu entdeckte Wikingerschatz umfasst neben einem Silberbecher verschiedene Schmuckstücke wie einen goldenen Armreif und über 600 Silbermünzen.

BRITISH MUSEUM

EVOLUTION

Energiesparmodell Zweibeiner

CARY WOLINSKI

Auf dem Laufband verglichen Forscher den Sauerstoffverbrauch bei der zwei- oder vierbeinigen Fortbewegung von Menschen und Schimpansen.

Warum unsere äffischen Vorfahren vor etwa sieben Millionen Jahren begonnen haben, sich statt auf allen vieren nur noch auf zwei Beinen fortzubewegen, ist bis heute umstritten. Einen Faktor, der den Zweifüßern auf längere Sicht einen Vorteil verschaffte und damit die Umstellung letztlich begünstigte, konnten Forscher von der University of California in Davis jetzt nachweisen: Die neue Fortbewegungsart sparte Energie.

Für die Studie mussten vier Menschen und fünf Schimpansen aufs Laufband steigen. Die Wissenschaftler maßen die Muskelaktivität, den Sauerstoffverbrauch, die auf den Boden ausgeübte Kraft und die Zeitspanne zwischen Anheben und Auf-treten der Füße. Wie sich zeigte, verbrauchten die Vertreter von *Homo sapiens* gegenüber den Menschenaffen 75 Prozent weniger Energie. Ob die Schimpansen auf vier oder zwei Beinen gingen, spielte dagegen kaum eine Rolle. Das liegt offenbar an ihrem Körperbau: Die Affen haben kürzere Beine als Menschen und ihr Schwerpunkt befindet sich beim aufrechten Gang vor der Hüfte. Sie können deshalb nur gebückt gehen und nicht die langen Schritte machen, die den Menschen einen Großteil ihrer Energieeinsparung bringen. Ob unsere Ahnen sich damals, nachdem eine Klimaänderung ihren Lebensraum weit gehend entwaldet hatte, auf zwei Füße erhoben, um weiter sehen zu können oder um die Hände frei zu haben, sei dahingestellt. Jedenfalls brachte der aufrechte Gang erst einmal keine energetischen Nachteile. Und nach relativ geringfügigen anatomischen Anpassungen erwies er sich sogar als ausgesprochen ökonomisch.

Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd.104, S. 12265

GEOLOGIE

Rülpsender Vulkan

Es ist wie Aufstoßen: Im Schlot des Stromboli dringen durch das Magma immer wieder große Gaspakete nach oben. Sie dehnen sich mit abnehmendem Druck rasch aus und schleudern beim Zerplatzen an der Oberfläche Fetzen glutflüssigen Gesteins bis zu mehrere hundert Meter hoch. Solche Ausbrüche gehen oft mit schwachen Beben und akustischen Signalen in etwa 250 Meter Tiefe einher. Dort vermuteten Wissenschaftler deshalb auch den Ursprung der Gaspakete. Wie beim Öffnen einer Sektflasche das gelöste Kohlendioxid frei wird, sollten demnach bei nachlassendem Umgebungsdruck Blasen aus dem Magma ausperlen und miteinander verschmelzen.

Doch nun konnten Forscher um Mike Burton vom Nationalinstitut für Geophysik und Vulkanologie in Catania zeigen, dass die explosiven Pakete bereits in einer Tiefe von bis zu drei Kilometern entstehen. Mit einem ferngesteuerten Infrarot-Spektroskop bestimmten sie aus der sicheren Entfernung von 240 Metern die chemische Zusammensetzung der regelmäßigen Ausdünstungen des Vulkanschlots und verglichen sie mit derjenigen der Gaswolken, die bei den Rülpsern austreten.

Die beobachteten Unterschiede ließen sich nur damit erklären, dass zwar die ständigen Ausgasungen dicht unter der Oberfläche entspringen, die explosiven Blasen aber von sehr viel weiter unten kommen. Die Erschütterungen in nur 250 Meter Tiefe bei ihrem Austritt führen die Forscher auf eine Schichtgrenze an dieser Stelle zurück, die den Verlauf der Magmakanäle ändert. Das verursacht Turbulenzen in den aufsteigenden Gaspaketen, die das Rumoren hervorrufen dürften. *Science, Bd. 317, S. 227*

Bei einem typischen Ausbruch des Stromboli spritzen Magmafetzen mehrere hundert Meter hoch, wenn große Gaspakete aus dem Vulkanschlot entweichen.

MIKE BURTON, INGV CATANIA, ITALIEN

SOFTWARE BISQUE / LOCH NESS PRODUCTIONS, MARK C. PETERSEN / SKY & SKAN INC.

Auf Plutos Mond Charon (vorne) speien Geysire Wasser, das gefriert und Eisflächen an der Oberfläche erzeugt. Der Vorgang ist hier künstlerisch dargestellt.

PLANETOLOGIE

Geysire am Rand des Sonnensystems

Große Teile von Plutos Mond Charon sind mit Eis bedeckt. Aber woher stammt es? Forscher von der Universität von Arizona vermuten nun eine ungewöhnliche Quelle: Geysire. Dabei stützen sie sich auf eine Spektralanalyse durch die Teleskope Niri und Altair, mit der sich Spuren von Ammoniak nachweisen ließen. Das Gas wirkt als natürliches Frostschutzmittel und würde erklären, weshalb das mit ihm vermischte Wasser im flüssigen Zustand durch Risse in der extrem kalten Oberfläche austreten kann, bevor es nach dem Ausstoß ins All gefriert und ausschneit.

Nach Schätzungen der Wissenschaftler dürften die Eruptionen jeweils wenige Stunden bis einige Tage dauern und die Eisschicht auf Charon in 100 000 Jahren um etwa einen Millimeter wachsen lassen. Nur auf diese Weise wird verständlich, warum die Oberfläche des Pluto-Trabanten einen so frischen Eindruck macht und die Eiskristalle dort, vermischt mit Ammoniakhydrat, ungewöhnlich gut erhalten sind. Stimmt das Geysirmodell, müsste Charon in seinem Innern flüssiges Wasser enthalten. Gewissheit wird wohl die Nasa-Sonde »New Horizons« bringen, die den Rand des Sonnensystems im Jahr 2015 erkunden soll.

Kryovulkanismus mit Wasserfontänen ist auch andernorts im All schon beobachtet worden, etwa auf Saturns Mond Enceladus. Dort sorgen allerdings die enormen Gezeitenkräfte des Planeten für die spontanen Eruptionen. Auf Charon scheidet diese Ursache aus. Eine Erklärung wären radioaktive Zerfallsprozesse im Innern des Monds, die Energie freisetzen und so das Wasser-Ammoniak-Gemisch flüssig halten.

Pressemitteilung des Gemini-Observatoriums

INFORMATIK

Einfühlsamer Computer

Manche Menschen entwickeln zu ihrem Computer ein geradezu persönliches Verhältnis: Sie lieben ihn wie einen guten Freund oder hassen ihn als boshaften, unberechenbaren Gegner. Doch die Gefühle bleiben stets einseitig. Die Maschine kann sie weder erkennen noch gar erwidern.

Das wird sich vielleicht bald ändern. Forscher vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen in Erlangen haben ein System zur Gesichtsfeinanalyse entwickelt, das nicht nur männliche und weibliche Physiognomien zu unterscheiden vermag, sondern auch die Stimmung von Personen an der Mimik abliest. Um diese Fähigkeit zu erwerben, verglich es in einer Trainingsphase eine riesige Anzahl von Gesichtern und ermittelte dabei mit menschlicher Hilfe typische Indikatoren für Gemütszustände. Jetzt kann das Programm auf eine Datenbank aus fast 30 000 Konturen, Augen, Brauen und Münder zurückgreifen und so den Gesichtsausdruck selbstständig einordnen.

Das eröffnet viele interessante Anwendungsmöglichkeiten. Eine wäre das Testen von Lernsoftware: In Verbindung mit einer Videokamera registriert das System in Echtzeit, wo die Versuchsperson ratlos, gestresst oder gelangweilt wirkt. Die Entwickler können ihre Software dann entsprechend nachbessern.

Den größten Nutzen des Programms sehen die Erlanger Forscher aber in der Werbung. Wie zum Beispiel ein Plakat auf vorübergehende Menschen wirkt, ließe sich vollautomatisch live erfassen – zumal das System mehrere Gesichter gleichzeitig erkennen und deuten kann. Werbestrategen kämen so an unschätzbare Informationen.

Pressemitteilung der Fraunhofer-Gesellschaft

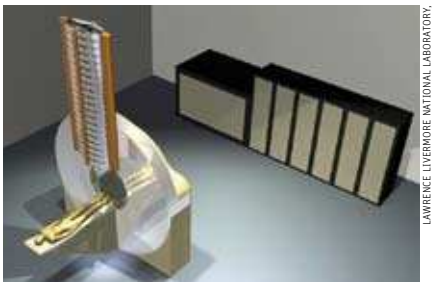
TUMORBEHANDLUNG

Minibeschleuniger zur Krebstherapie

Die Erfindung eines kompakten, in jeder Klinik einsetzbaren Protonenbeschleunigers könnte eine Revolution im Kampf gegen Krebs einläuten. Die Protonentherapie gilt insbesondere bei der Behandlung von Tumoren in sensiblen Körperregionen als wegweisend. Krebsgeschwüre werden dabei mit ultraschnellen Wasserstoffkernen beschossen, die Tumorzellen abtöten, indem sie deren DNA irreparabel schädigen.

Gegenüber Röntgenstrahlen haben Protonen den großen Vorteil, dass man über die Geschwindigkeit genau steuern kann, in welcher Tiefe im Gewebe sie ihre Energie abgeben. Dadurch werden umliegende gesunde Zellen kaum beeinträchtigt. Bislang ließen sich die benötigten schnellen Protonen aber nur in kilometerlangen Teilchenbeschleunigern erzeugen, die wegen ihrer Größe und immensen Kosten lediglich in einer Hand voll Krebsbehandlungszentren zur Verfügung stehen. Dies könnte sich nun ändern.

Ein Physikerteam um Thomas R. Mackie von der Universität von Wisconsin hat einen so genannten *dielectric wall accelerator* (DWA) entwickelt, der mit einer Beschleunigungsstrecke von zwei Metern auskommt.



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY, TOMO THERAPY INC. UND UC DAVIS CANCER CENTER

Künstlerische Darstellung des Miniprotonenbeschleunigers, der schon bald die Protonentherapie gegen Krebs in jedem Klinikum möglich machen soll.

Dazu wird eine von einem Isolator umgebene Röhre evakuiert, was die Durchschlagsresistenz enorm erhöht. So lässt sich ein extrem starkes elektrisches Feld anlegen, das die Protonen im Innern der Röhre im nötigen Maß beschleunigt. Derzeit wird am Lawrence Livermore Laboratory (Kalifornien) ein Prototyp gebaut. Bis zu ersten klinischen Tests dürften laut Mackie noch mindestens fünf Jahre verstreichen.

Pressemitteilung des American Institute of Physics

Mitarbeit: J. Maier, R. Gast, S. Hollstein, S. Fischer

Fresszellen in Aktion

Makrophagen verschlingen in den Körper eingedrungene Mikroben und zerlegen sie in speziellen Strukturen in ihrem Innern, den Lysosomen. Das angefärbte elektronenmikroskopische Bild zeigt eine solche Fresszelle bei der Aufnahme von Tuberkelbazillen (orangefarben). Diese verhindern allerdings auf bislang unbekannte Weise die Überführung in Lysosomen und überleben dadurch. Dazu benötigen sie, wie die Gruppe von Jean Pieters an der Universität Basel schon 2005 nachwies, ein zelleigenes Protein namens coronin 1. Wird es in Mäusen gentechnisch ausgeschaltet, können Makrophagen die Keime vernichten. Derselbe Effekt lässt sich, wie die Wissenschaftler in Basel nun zeigten, auch mit Sustanzen erzielen, die wie der Wirkstoff Ciclosporin, mit dem Abstoßungsreaktionen nach Organtransplantationen unterdrückt werden, den Immunregulator Calcineurin hemmen. Damit eröffnet sich ein neuer Weg zum Kampf gegen Tuberkulose, die weltweit wieder auf dem Vormarsch ist.

HEINZ G. BEER / UNIVERSITÄT ERLANEN-NÜRNBERG

KULTURGESCHICHTE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Moderne Mathematik in islamischen Ornamenten

Mittelalterliche islamische Künstler nutzten für ihre komplexen Linienornamente Prinzipien der Selbstähnlichkeit und Quasiperiodizität, die im Westen erst ein halbes Jahrtausend später entdeckt wurden.

Von Stefan Maier

Linienornamente in Form von Vielecken und Sternen sind das Markenzeichen der Bauwerke aus dem islamischen Mittelalter. Diese so genannten Girih-Muster (nach dem persischen Wort für Knoten) verzieren sowohl Paläste wie die Alhambra im spanischen Granada als auch Moscheen und Schreine verehrter Imame im Nahen Osten.

Wie haben es die islamischen Baumeister geschafft, die hochkomplexen geometrischen Verzierungen zu erzeugen? Bisher galt die Ansicht, dass sie dafür nur Lineal und Zirkel einsetzten. Doch dies haben Peter J. Lu von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) und Paul J. Steinhardt von der Universität Princeton (New Jersey) nun widerlegt. Wie die beiden Physiker herausfanden, benutzten die islamischen Künstler eine von moderner Mathematik durchsetzte Methode *(Science, Bd. 315, S. 1106)*. Dabei stützten sie sich offenbar auf geometrische Zusammenhänge, die westliche Wissenschaftler erst im 19. und 20. Jahrhundert entdeckten.

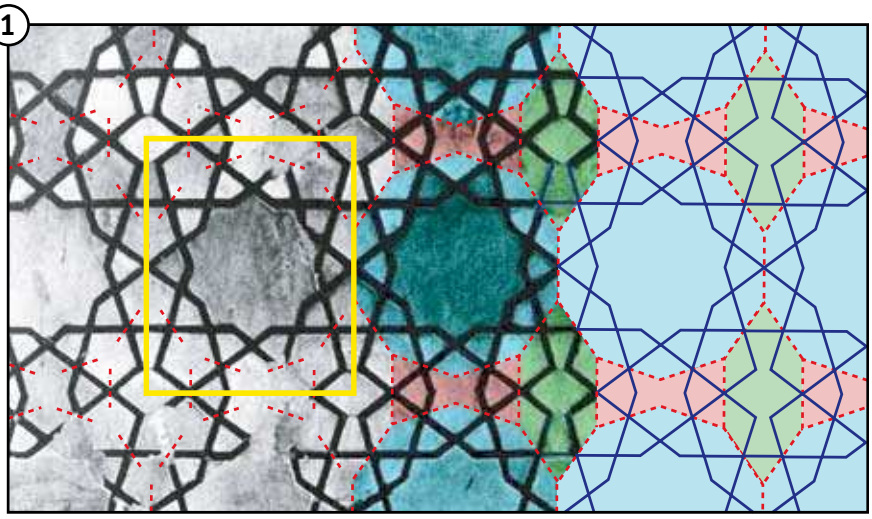
Ein besonders schönes Beispiel eines Girih-Musters bietet der Schrein von Khwaja Abdullah Ansari im afghanischen Herat, der zwischen 1425 und 1429 entstand (Bild unten). Zwar lassen sich die regelmäßig erscheinenden Zickzackmuster sehr wohl ausschließlich mit Lineal und Zirkel erzeugen, indem man eine bestimmte Abfolge von Schritten einhält – was dem an die Schulgeometrie zurückdenkenden Leser ganz einleuchtend erscheinen mag. Wer jedoch vor einem derartig verzierten Bauwerk steht, erkennt schnell, wie ungeheuer aufwändig und fehlerträchtig eine solche Vorgehensweise gewesen wäre.

Lu und Steinhardt entdeckten bei der Untersuchung einer Vielzahl von Fassaden, Schriftrollen mit Bauskizzen und Verzierungen mittelalterlicher Koranausgaben nun ein überraschend einfaches Verfahren zur Erzeugung dieser großflächigen Muster. Demnach entstanden sie durch Aneinanderreihung von Kacheln, auf denen in systematischer Weise Lini-

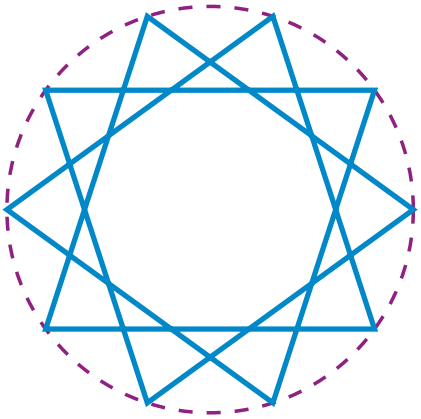
Das Ornament auf dem Schrein von Khwaja Abdullah Ansari im afghanischen Herat (1) lässt sich zwar auch mit Zirkel und Lineal konstruieren (2–5). Viel einfacher gelingt das aber mit speziellen Kacheln, die ein Linienmuster tragen: einem Zehneck (blau), einem Sechseck (grün) und einer Fliege (rosa).

Dieses besonders prachtvolle Ornament in einem Bogengang des Darb-i-Imam-Schreins in Isfahan enthält zwei sich überlappende Girih-Muster.

1



2



MIT FREDL. GEN. VON K. DUDLEY UND M. ELLIFF

en eingezeichnet waren; aus diesen erwuchs dann das Ornament.

Zum Beispiel lässt sich das sternähnliche Motiv auf dem erwähnten Schrein von Khwaja Abdullah aus drei Arten unterschiedlich geformter Fliesen zusammensetzen: einem Zehneck, einem gestreckten Sechseck und einem Baustein, der an eine Fliege (Frackschleife) erinnert. Bei anderen Mustern kommen zu diesen drei Kacheln zwei weitere hinzu, nämlich ein Pentagon und eine Raute. Versieht man diese fünf Fliesentypen mit dem erwähnten Netz von Linien, die von den Seitenmitten ausgehen, lassen sich sämtliche bekannten Girih-Muster daraus konstruieren.

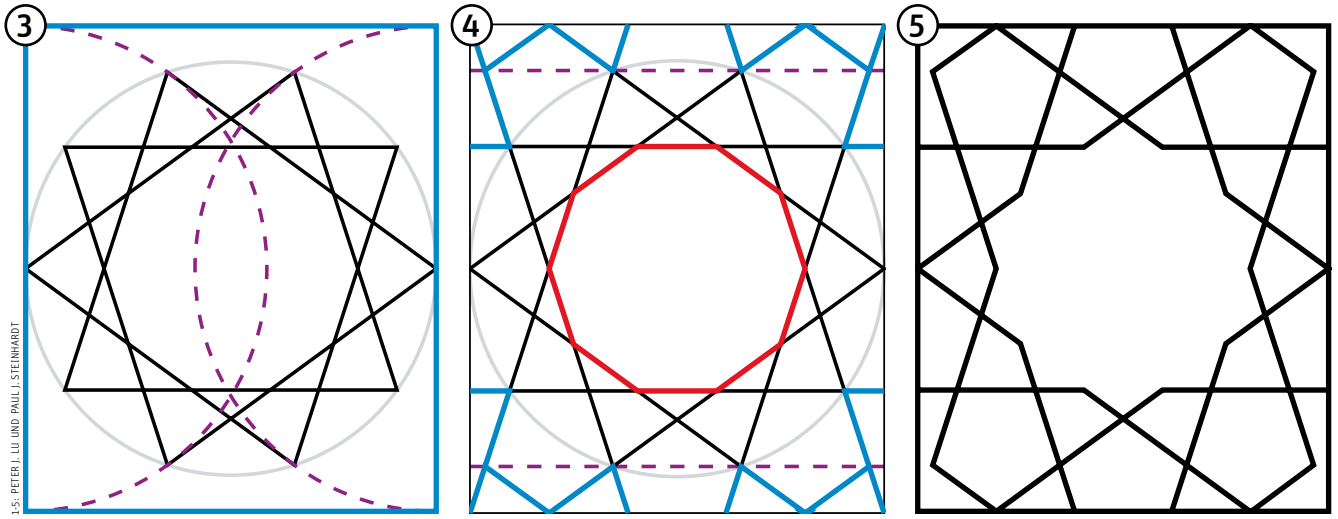
Während zunächst nur die Eleganz dieser Methode dafür sprach, dass sie tatsächlich eingesetzt wurde, fand sich später auch ein direkter Beleg für ihre Anwendung: Die Umrisse der Kacheln sind auf einer mittelalterlichen Schriftrolle aus dem Topkapi-Palast in Istanbul abgebildet (Bild oben auf S. 16).

Eine unmögliche Symmetrie

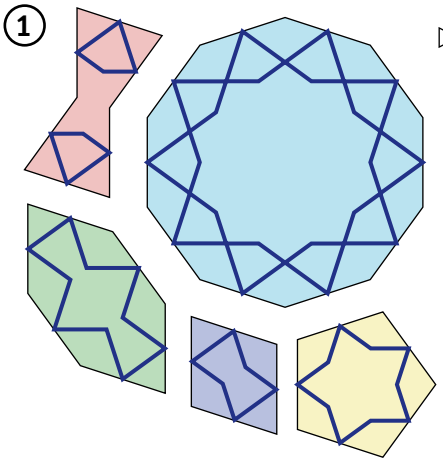
Die Fliesen-Methode stellt aber nicht nur einen bedeutenden kunsthandwerklichen Durchbruch dar, der vermutlich im 12. Jahrhundert stattfand, sondern offenbart auch ein tieferes geometrisches Verständnis. Mit bloßem Auge lässt sich schnell erkennen, dass die meisten Girih-Muster Figuren mit zehnzähliger Rotationssymmetrie aufweisen.

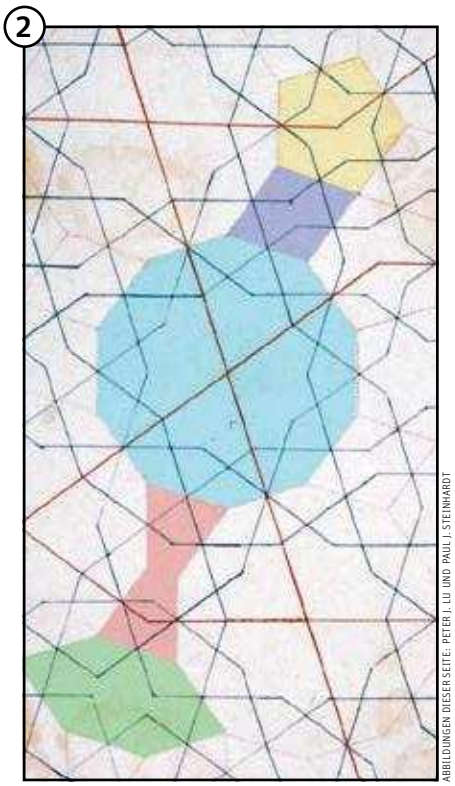
Ermöglicht wird dies dadurch, dass die Seiten der fünf Kachelformen gleich lang sind und Winkel einschließen, die aus Vielfachen von 36 Grad bestehen. Die auf ihnen eingezeichneten, von den Seitenmitten ausgehenden Linien bilden Winkel von entweder 72 oder 108 Grad – auch das Vielfache von 36 Grad oder dem zehnten Teil eines vollen Kreiswinkels. So ist sichergestellt, dass beim Zusammenlegen der Kacheln Figuren entstehen können, die eine zehnzählige Symmetrie aufweisen.

Diese Symmetrie gerät allerdings leicht in Konflikt mit der Regelmäßig- ▷



1-5: PETER J. LU UND PAUL J. STEINHARDT





ABBILDUNGEN DIESER SEITE: PETER J. LU UND PAUL J. STEINHARDT

Mit nur fünf verschiedenen Kacheln konnten sämtliche Muster auf mittelalterlichen islamischen Monumenten erzeugt werden (1). Auf einer Bauzeichnung aus dem Topkapi-Palast in Istanbul tauchen sie alle auf (2).

▷ keit des Ornaments. Mathematiker haben nämlich im 19. Jahrhundert herausgefunden, dass sich flächendeckende periodische Fliesenmuster – periodische Parkettierungen – nur aus Untereinheiten mit zwei-, drei-, vier- oder sechszähliger Rotationssymmetrie aufbauen lassen. Fünf- oder zehnzählige Kacheln sind dazu nicht geeignet. Um ihre regelmäßigen Ornamente zu erzeugen, passten die islamischen Künstler deshalb anfangs die geometrischen Grundelemente in größere Einheiten mit erlaubten Symmetrien ein.

Das Prinzip der Selbstähnlichkeit

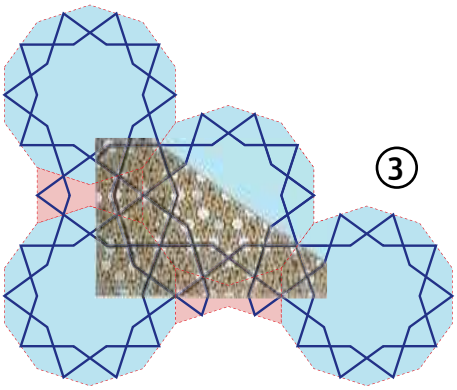
Zu Beginn des 15. Jahrhunderts kamen sie jedoch einen beachtlichen Schritt weiter: Sie fanden eine Möglichkeit, die zehnzählige Symmetrie auf das gesamte Fliesenmuster auszudehnen – was westliche Mathematiker erst Jahrhunderte später lernten. Das Mittel dazu war das Prinzip der Selbstähnlichkeit. Ein selbstähnliches Muster weist in mehreren Größenmaßstäben die gleichen Motive auf. Ein Beispiel dafür bieten, wie Lu und Steinhardt herausfanden, die Verzierungen des 1453 gebauten Darb-i-Imam-Schreins in Isfahan (Bild unten). Dort sind 231 Fliesen – Fliegen sowie Sechs- und Zehnecke – so angeordnet, dass sie zusammen wieder das Sternmuster auf der Zehneckkachel bilden.

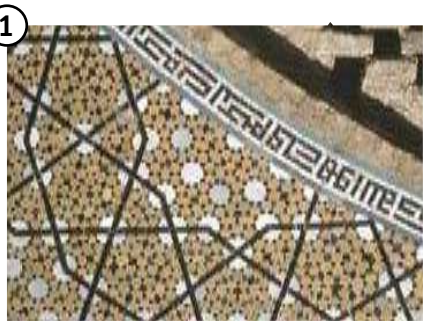
Solche selbstähnlichen Ornamente mit zehnzähliger Symmetrie können allerdings nicht mehr periodisch sein: Sie lassen sich also nicht erzeugen, indem man einfach ein Grundelement nimmt und es in einer Reihe nebeneinanderlegt. Stattdessen handelt es sich um quasiperiodische Muster, die im Westen erst im 20. Jahrhundert entdeckt wurden. Sie erscheinen auf den ersten Blick zwar geordnet, weisen jedoch keine über längere Strecken anhaltende Translationssymmetrie auf. Das Besondere: Die relative Häufigkeit, mit der zwei Kacheln auftauchen, entspricht einer irrationalen Zahl – also einer, die sich nicht als Bruch ausdrücken lässt.

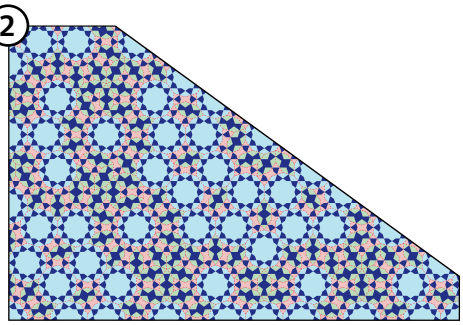
Die Verzierungen des Schreins bilden Lu und Steinhardt zufolge ein solches quasiperiodisches Muster, und zwar ein ganz berühmtes. Das Verhältnis der Anzahl der Sechsecke zu den Fliegen nähert sich bei zunehmender Ausdehnung dem Goldenen Schnitt an – wie das Mengenverhältnis der beiden Kacheln in der Aufsehen erregenden fünfzähligen quasiperiodischen Parkettierung, die Roger Penrose 1974 konstruiert hat.

Völlig perfekt ist das Muster des Schreins allerdings nicht. So enthält es eine geringe Anzahl von Fehlern: Elf von 3700 Kacheln sind falsch platziert. Vor allem aber ist es nicht völlig selbstähnlich, da die relative geometrische Anordnung der großen Kacheln nicht mit derjenigen der kleinen übereinstimmt. Deshalb bleibt unklar, ob die islamischen Künstler wirklich ein tieferes Verständnis der Quasiperiodizität erlangt hatten. Das schmälert jedoch nicht ihr Verdienst, wesentliche Elemente eines der großen Durchbrüche der Mathematik in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um ein halbes Jahrtausend vorweggenommen zu haben.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).







Selbstähnlichkeit in einem Ornament am Darb-i-Imam-Schrein in Isfahan: Die Kacheln sind so angeordnet, dass sich das Zehneck- und das Fliegenmotiv in größerem Maßstab wiederholen. Neben einem Foto des Mosaiks (1) ist seine Konstruktion aus Originalkacheln gezeigt (2). Die Zeichnung darüber (3) verdeutlicht das vergrößert wiederkehrende Fliesenmuster mit überlagertem Foto des Originals.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Computer knobeln an Stasi-Puzzle

Auferstehen aus Schnipseln sollen rund 45 Millionen Papierseiten der Stasi, die in den letzten Tagen des DDR-Regimes von Hand zerrissen wurden. Speziell dafür entwickelte Software wird derzeit in einem Pilotprojekt getestet.

Von Michael Dumiak

In Magdeburg steht in der Nähe der ehemaligen regionalen Dienststelle des DDR-Ministeriums für Staatssicherheit ein großes Lagerhaus. Dort stapeln sich auf drei Stockwerken Müllsäcke, etwa fünfzig pro Ablagebrett. Insgesamt sind es 16250 Stück. Jörg Stoye, Chef dieses seltsamen Archivs, deutet mit der Fußspitze auf einen davon. »Kartoffelsack«, meint er grinsend.

Doch der Inhalt wiegt schwerer als Kartoffeln. Die Säcke enthalten Schnipsel von teils brisanten Dokumenten aus der DDR. Einige beschreiben ostdeutsche Spionageaktionen gegen Westdeutschland. Andere enttarnen Denunzianten. Wieder andere sind wohl nur banale Zeugnisse eines zwanghaften Bespitzelungswahns: Notizen über Unterhaltungen und Beziehungen, die sich für den Staat großenteils als uninteressant herausstellten, aber bedeuteten, dass jemand seinen Freund oder gar Ehepartner verraten hat.

Diese Papierfetzen verstauben seit fünfzehn Jahren. Nun aber wurde mit Hilfe von Scannern und einem riesigen Rechnerverbund endlich damit begonnen, die letzten fehlenden Seiten eines dunklen Kapitels der deutschen Geschichte zusammenzusetzen.

Die Idee, dafür ein eigens erstelltes Computerprogramm zu verwenden, geht zurück bis ins Jahr 1993. Doch erst eine Ausschreibung für die Software zehn Jahre später brachte das Projekt ins Rollen. Finanzierungsprobleme im geldknappen Berlin sorgten allerdings für weitere Verzögerungen. Erst diesen April bewilligte die Regierung schließlich 6,3 Millionen Euro für eine zweijährige Pilotstudie, in deren Verlauf 400 Säcke voller Schnipsel rekonstruiert werden sollen.

Während des Kalten Krieges standen rund 90000 Personen auf der Gehaltsliste der Stasi. Daneben trug ein Netz von 300000 »inoffiziellen Mitarbeitern« Informationen über sechs Millionen Menschen zusammen – rund ein Drittel der Bevölkerung. Als sich im Herbst 1989 das Ende des Regimes abzeichnete, begann das große Schreddern. Jeder kannte die Stasi, aber wenige ahnten, wie tief ihr Geheimdienstnetz in den Alltag vorgedrungen war. Die Spitzel hatten somit allen Grund, durch die Vernichtung von Akten Spuren zu beseitigen.

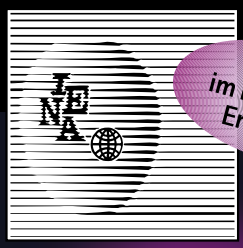
Die wichtigsten und heikelsten Dokumente kamen als Erstes in den Reißwolf. Doch die Maschinen gaben wegen Überlastung bald den Geist auf, erzählt Günter Bormann, Chef des Leitungsbüros der Bundesbehörde für die Stasi-Unterlagen in Berlin. Und so machten die Agenten und ihre eigens rekrutierten Helfer per Hand weiter. Geschätzte 45 Millionen Din-A4-Seiten zerlegten sie in jeweils acht bis dreißig Teile. »Tag und Nacht zerrissen sie Akten«, berichtet Bormann. »Das war ihre abschließende Beschäftigung in den letzten Tagen. Die machten das nicht zum Spaß.«

Digitale Archäologie

Nun sollen die Schnipsel wieder zusammengefügt werden. Diese Aufgabe übernehmen diesmal schnelle, raffinierte Algorithmen, die am Berliner Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik entwickelt wurden. Dort hat Bertram Nickolay seine jahrzehntelange Erfahrung bei der Entwicklung von Mustererkennungssoftware in das Projekt eingebracht. Das Ergebnis ist im Wesentlichen eine lernfähige Suchmaschine, die zusammengehörige Dokumentfetzen auffindet und verbindet.

Wie Jan Schneider aus Nickolays Team erklärt, läuft das Verfahren letztlich auf einen logischen, aber komplizierten Aussiebeprozess hinaus. Zur Ver- ▷

IENA 2007



Internationale Fachmesse
■ Ideen ■ Erfindungen ■ Neuheiten
1.– 4. November 2007

● **Neue Ideen für den Markt.** Die IENA 2007 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
● **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
● Die **IENA 2007** ist einer der 365 Orte im „Land der Ideen" (4.11. Aktionstag: „Deutschland - Land der Ideen")
● **Fachberatung und Information**

Welcome to Germany
Land of Ideas

Messe Nürnberg · Halle 12

Veranstalter/Organisation
AFAG Messen und Ausstellungen GmbH
Projektmanagement IENA 2007
Messezentrum 1, 90471 Nürnberg
☎ 09 11 – 9 88 33 – 570
09 11 – 9 88 33 – 579
E-Mail: iena@afag.de · Internet: www.iena.de

Säcke voller zerrissener Stasi-Dokumente stapeln sich in einem Lagerhaus in Magdeburg. Mit spezieller Software sollen die Blätter wieder zusammengesetzt werden.

MICHAEL DUMIAK

anschaulichung öffnet er eine Computerdatei mit 200 gescannten Schnipseln. Er wählt ein blassgrünes Stück liniertes Papier aus, über das sich schräg eine tintenblaue Handschrift zieht. Die Algorithmen scheiden alle Schnipsel aus, die keine ähnlichen Merkmale aufweisen.

Von den verbliebenen ermittelt das System der Reihe nach die Ränder und vergleicht sie jeweils mit denen des ausgewählten Fetzens. Wenn ein passendes Gegenstück gefunden ist, wird es mit dem vorhandenen zu einem neuen Fragment verschmolzen und dieses mit den restlichen Schnipseln abgeglichen. Sekunden später erscheint am Bildschirm ein zusammengesetztes Dokument: die erste Seite des monatlichen Berichts eines Potsdamer Stasi-Agenten vom Frühjahr 1989.

Die Gruppe um Nickolay wird für das Projekt einen Verbund aus hundert Computern einsetzen, um die nötige Rechenleistung und die riesige Speicherkapazität – etwa 64 Terabyte – für das Sortieren der unzähligen Schnipsel aufzubringen. Nach Schneiders Aussage gibt es zwar auch andere Programme zur Mustererkennung und Dokumentrekonstruktion, aber keines davon verfügt über die Kombination von Einzelfähigkeiten, wie diese Aufgabe sie erfordert.

Mit ihrem Vorhaben, das man als digitale Archäologie bezeichnen könnte, wollen die Fraunhofer-Forscher weitere Details einer Ära zurückholen, deren Aufarbeitung noch längst nicht abgeschlossen ist, auch wenn das öffentliche Interesse daran allmählich erlahmt. Das rekonstruierte Material soll die 39 Millionen Karteikarten und 180 Kilometer Akten ergänzen, die beim Ende der DDR intakt aufgefunden wurden und von der Bundesbeauftragten für die Stasi-Unterlagen verwaltet werden.

Sogar im Ausland hat das Projekt mittlerweile Interesse geweckt. Der südafrikanische Bischof Desmond Tutu sowie Beamte aus Chile, dem ehemaligen Jugoslawien und Irak sind aufmerksam geworden, erzählt Bormann. Geschredderte Dokumente, repressive Regime und geheime Bespitzelung waren schließlich nicht auf die DDR beschränkt.

Michael Dumiak ist Berliner Korrespondent von Scientific American.

PROTEINFALTUNG Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

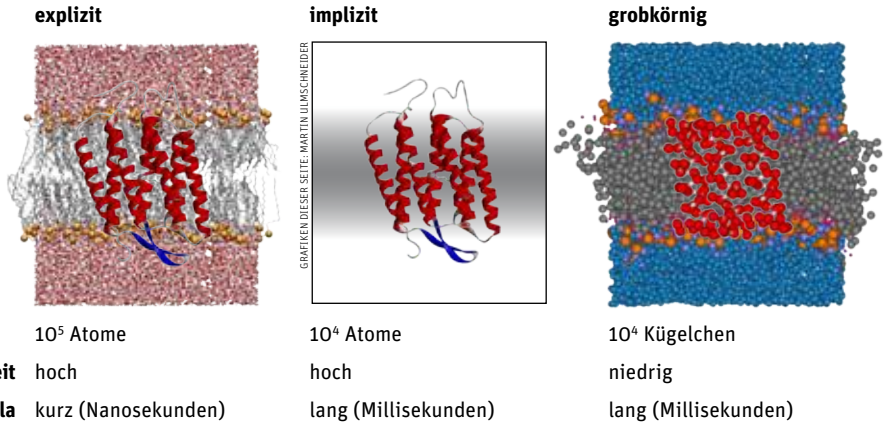
Monte Carlo in der Membran

Mit geschickten Vereinfachungen und vom Glücksspiel abgeleiteten Optimierungsverfahren konnten zwei junge deutsche Molekularbiologen erstmals die räumliche Faltungsstruktur von Membranproteinen mit atomarer Genauigkeit simulieren. Fernziel sind neue, wirksamere Medikamente.

Von Michael Groß

Proteine erblicken das Licht der Welt als simple Ketten von aneinandergereihten Aminosäuren. Damit sie ihre jeweilige Aufgabe – etwa als Enzym, Botenstoff oder Schleuse – erfüllen können, müssen sie erst einmal eine kompakte dreidimensionale Form annehmen, indem sie sich nach einem genauen Plan in Schlaufen legen. Diesen Vorgang bezeichnen Biophysiker als Faltung. Er ist keineswegs einfach, da selbst kleine Proteine, die nur aus wenigen Aminosäuren bestehen, unermesslich viele »falsche« Strukturen annehmen können. Die meisten Organismen verfügen deshalb über spezielle Faltungshelfer, die nach dem englischen Wort für Anstandsdame Chaperone genannt werden. Auch Computerprogramme tun sich äußerst schwer, den Vorgang nachzuvollziehen und die korrekte finale 3-D-Struktur einer bestimmten Aminosäurekette vorherzusagen.

Dank rasanter Fortschritte im Bereich der Hard- und Software sowie bei Untersuchungsmethoden wie der kernmagnetischen Resonanzspektroskopie (NMR) versteht man die Proteinfaltung heute sehr viel besser als etwa noch vor zehn Jahren. Dabei haben die Forscher wie in vielen anderen Wissensgebieten zunächst die niedrig hängenden Früchte gepflückt, auch wenn die schwieriger zu erreichenden womöglich saftiger sind. So kennt man die Faltung von kleinen, wasserlöslichen Proteinen wie Lysozym und Barnase inzwischen buchstäblich bis hin zum Verhalten einzelner Aminosäuren. Diese Verbindungen lassen sich einerseits kristallisieren, was die Möglichkeit eröffnet, durch Röntgenbeugung ihre Struktur zu bestimmen. Andererseits kann man von ihnen in gelöster Form gut NMR-Spektren aufnehmen und daraus das Fal-



Die Faltung eines Membranproteins in seiner Umgebung in atomarer Auflösung zu simulieren (links) würde selbst heutige Computer überfordern. Ein Ausweg ist, Gruppen von Atomen durch Kügelchen zu ersetzen und mit diesen zu rechnen (rechts). Genauere Resultate liefert ein neuer Ansatz, bei dem die Membran nicht explizit, sondern implizit durch ihre relevanten physikalischen Eigenschaften repräsentiert wird (Mitte). Als Beispiel ist hier das Bakteriorhodopsin gezeigt, dessen Faltungsstruktur experimentell bestimmt wurde.

tungsmuster ermitteln. Schließlich sind sie wegen ihrer geringen Größe auch einer Computersimulation zugänglich.

Fast durchweg außer Reichweite blieben hingegen die größeren, wasserunlöslichen Membranproteine. Dabei sind gerade diese Moleküle, darunter Hormonrezeptoren und Ionenkanäle, als Wirkorte für alte und neue Medikamente von größtem Interesse für die Pharmaindustrie. Bei den meisten von ihnen gelang bisher jedoch keine Kristallisation und folglich auch keine Röntgenstrukturanalyse. Außerdem ist die NMR-Spektroskopie in diesem Fall schlecht anwendbar. Computersimulationen bieten daher eine willkommene Alternative. Doch auch sie werfen erhebliche Probleme auf.

Allein die Größe der Membranproteine ist für numerische Modellierungen ein fast unüberwindliches Hindernis. Deshalb muss man sich auf besonders interessante Teilbereiche beschränken – etwa die Region, die innerhalb der Membran liegt und dort einen Kanal bildet. Erschwerend kommt hinzu, dass ein Protein seine spezielle Faltungsstruktur nur in einer geeigneten Umgebung annimmt. Diese ist bei Membranen besonders komplex, weil sie auch deren Lipide enthält und nicht nur die sonst üblichen Wassermoleküle. Sie Atom für Atom mitzuberücksichtigen, treibt den Rechenaufwand schnell ins Astronomische, was Faltungssimulationen unmöglich macht.

Deshalb sind Vereinfachungen nötig. So kann man auf atomare Auflösung verzichten. Der Computer fasst dann Gruppen von Atomen in geeigneter Weise zu Kügelchen zusammen und rechnet mit diesen. Das Ergebnis ist ein grobkörniges Bild, das eine gewisse Vorstellung von der Struktur vermittelt. Doch bleibt dieser Ansatz unbefriedigend.

Auf der Suche nach Alternativen wurden deshalb Computermodelle entwickelt, welche die Umgebungsmoleküle nicht explizit, sondern in einer verallgemeinerten, impliziten Form enthalten. Als erfolgreichster Ansatz, der bei der Modellierung wasserlöslicher Proteine bereits seine Bewährungsprobe bestanden hat, erwies sich die so genannte verallgemeinerte Born-Methode, bei der Wasser als polarisierbares Dielektrikum dargestellt wird. Um sie auf eine Membran auszudehnen, muss man sie so modifizieren, dass die Polarisierbarkeit dieses Dielektrikums von deren Außenseite zu ihrem Zentrum hin stetig abnimmt. Das entspricht dem Übergang zu einem Medium, das immer unpolarer und damit wasserabweisender (hydrophober) wird.

Zur Simulation der Wechselwirkungen zwischen dem Protein und seiner Umgebung sind so genannte effektive Born-Radien für die Atome zu ermitteln. Sie spiegeln deren Fähigkeit wider, ihr Umfeld zu polarisieren – vor allem Wassermoleküle in ihrer Nachbarschaft auszurichten. Das gelingt umso schlechter, je größer der Born-Radius ist. Für ein Atom an der Moleküloberfläche entspricht er in etwa dem üblichen Van-der-Waals-Radius; mit zunehmender Distanz vom umgebenden Wasser wächst er jedoch stark an. Er hängt somit von der Struktur des Proteins ab und muss bei jedem Zeitschritt der Simulation neu berechnet werden. Dazu gibt es verschiedene Methoden, in deren geschickter Konstruktion einer der Knackpunkte des Verfahrens liegt.

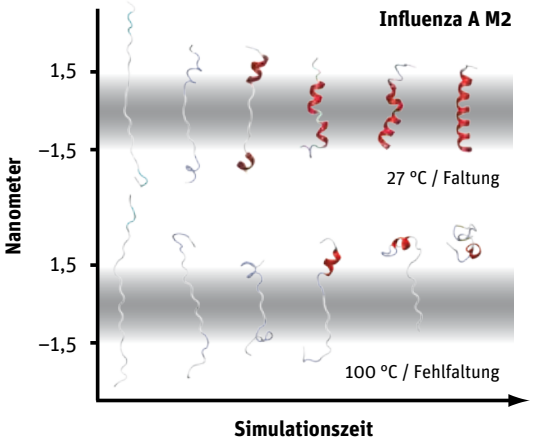
Mit Zufallsschritten zum Ziel

Auf diese Weise konnten Martin Ulmschneider von der Universität Oxford und sein Bruder Jakob von der Universität Rom jetzt die Faltung mehrerer Proteine in einer »impliziten« Membran simulieren. Dazu benutzten sie eine so genannte Monte-Carlo-Methode. Dabei findet ein Molekül über viele Millionen kleiner Zufallsschritte zu dem Zustand, der für die vorliegende Umgebung energetisch am günstigsten ist. Die Forscher konnten das Verhalten der Proteine in atomarer Auflösung über einen Zeitraum von mehreren Mikrosekunden simulieren, was für den Faltungsvorgang ausreicht *(Biophysical Journal, Bd. 92, S. 2338)*.

Zunächst testeten die Ulmschneider-Zwillinge ihre Methode an einfachen synthetischen Peptiden aus einem guten Dutzend Aminosäuren, deren strukturelle Vorlieben bereits bekannt waren. So vergewisserten sie sich, dass das Computermodell nicht etwa Strukturen liefert, die experimentell nicht beobachtbar sind.

Als erste Untersuchungsobjekte aus der Natur wählten sie dann ein Protein des Grippevirus (das M2-Protein von Influenza A) sowie das menschliche Prote-

Mit der impliziten Membranmethode ließ sich vom Protein M2 des Grippevirus die Struktur des Membrankanals bei Körpertemperatur korrekt simulieren (oben). Ebenfalls in Einklang mit der Realität ergab die Modellierung bei hohen Temperaturen ein nur teilweise gefaltetes Protein, das aus der Membran herausgedrängt wurde.



in Sarcolipin, das vor allem in Skelettmuskeln vorkommt *(Proteins 2007, im Druck)*. Der virale Eiweißstoff bildet in den Zellmembranen der infizierten Personen einen Kanal für Wasserstoffionen (Protonen), den die antiviralen Medikamente Amantidin und Rimantidin blockieren und so einer Grippeinfektion entgegenwirken können.

Jakob Ulmschneider und Kollegen modellierten den betreffenden Abschnitt bei zehn verschiedenen Temperaturen. Die Simulationen ergaben in Einklang mit experimentellen Ergebnissen, dass er sich bei 27 bis 63 Grad Celsius als eine Alpha-Helix – eine wie Korkenzieherlocken gewundene Form der Aminosäurekette – quer durch die Membran spannt. Die Schraubenbildung beginnt dabei interessanterweise an der Grenzfläche zwischen Membran und wässrigem Medium.

Bei rund 100 Grad Celsius kann sich zwar auch vorübergehend ein kurzer Helix-Abschnitt innerhalb der Membran bilden. Doch bleibt diese Anordnung nicht erhalten. Am Ende der Simulation befindet sich das Molekül draußen vor der Tür, also im wässrigen Medium, und die Aminosäurekette ist hoffnungslos verknäuelt statt sauber gefaltet.

Sarcolipin hingegen, ein Membranprotein, das die Aktivität einer Kaliumpumpe im Muskel reguliert, blieb bei allen Temperaturen fest in der Membran verankert. Die Simulationen ergaben jedoch ebenfalls einen graduellen Strukturverlust bei höheren Temperaturen, entsprechend dem bekannten Phänomen der Hitzedenaturierung von Proteinen.

Kritische Kraftfelder

Auch das Team von Charles Brooks am Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) hat mit ähnlichen Simulationen Ergebnisse erhalten, die im Wesentlichen mit der experimentell ermittelten Realität übereinstimmen *(Biophysical Journal, Bd. 92, S. 854)*. Allerdings benutzte es nicht dasselbe Computerprogramm. Da das von den Amerikanern eingesetzte Verfahren weniger effizient arbeitet, lag der Rechenaufwand wesentlich höher, sodass die simulierten Zeitspannen nur bis zu zwanzig Nano- statt mehrere Mikrosekunden betrugen. Außerdem ergaben sich selbst bei sehr hohen Temperaturen noch wohlgeordnete Alpha-Helices – im Widerspruch zur Realität.

Das liegt an Brooks' Wahl des »Kraftfelds«, das die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Atomen des zu simulierenden Moleküls bestimmt. Kraftfelder wurden unter großem Aufwand über Jahre hinweg mit Hilfe einer Fülle von Experimentaldaten erstellt und verifiziert, um die feinen energetischen Unterschiede zwischen verschiedenen Strukturen genau zu erfassen. Manche wie das von Brooks verwendete »param22«, das lange Zeit den Standard darstellte, neigen jedoch dazu, gewisse Faltungsmotive – wie Alpha-Helices – überzubetonen. Die Ulmschneider-Brüder benutzten dagegen das so genannte OPLS-Kraftfeld, das keine solche verfälschende Tendenz aufweist. Es wurde von Jakobs Doktorvater William Jorgensen von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) erstellt.

Die nächste große Herausforderung ist nun, die neue Methode auch an solchen Membranproteinen zu erproben, über deren Struktur noch gar keine Informationen vorliegen. Sollte sie auch dort korrekte Ergebnisse liefern, wäre ihr ein prominenter Platz in der Pharmaentwicklung sicher.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

ACADEMICS
academics.de

Nutzen Sie mit uns Ihre Karrierechancen rund um den Globus: www.academics.de

Drescher Station des Alfred-Wegener-Instituts Foto: Simon+Simon

» Größter Stellenmarkt für Lehre und Forschung im deutschen Sprachraum
» Mit individuellen Suchagenten immer über passende Stellen informiert
» Persönliche Karriereberatung und umfassende Stipendiendatenbank
» Hintergrund- und Insiderinfos rund um Hochschulen, Habilitationen und Berufungen

Das Karriereportal der Wissenschaft von:

Forschung & Lehre
DIE ZEIT

BAUGESCHICHTE

Beredter Mörtel

Die römische Siedlung Flavia Solva, die mittelalterliche Burg Schachenstein oder die Grazer Leechkirche verbindet eines: Mörtel und Putz halten sie seit Jahrhunderten zusammen. Nun haben die Autoren und Kollegen eine Zeitreise durch die Geschichte dieser alten Baustoffe unternommen.

Von Barbara Kosednar-Legenstein und Martin Dietzel

Die Erhaltung, Instandsetzung und Wiederherstellung bedeutender historischer Bauwerke sind ein wichtiger Beitrag zur Bewahrung unseres kulturellen Erbes. Dabei sollten möglichst originalgetreue Baustoffe verwendet werden – nicht nur, damit das Ergebnis authentisch bleibt, sondern auch, weil ungeeignete Materialien binnen Kurzem neuerliche Schäden verursachen können.

Eine originalgetreue Restauration erfordert vor allem die detaillierte Kenntnis der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung des einst aufgetragenen Mörtels und Putzes. Aus diesem Grund haben wir im Rahmen eines internationalen Projekts an 22 historischen Gebäuden – von der römischen Antike über das Mittelalter bis zur frühindustriellen Zeit – die alten Rezepturen untersucht. Dabei konnten wir viele interessante Rückschlüsse auf ehemalige Techniken und Gepflogenheiten ziehen. Zudem erprobten wir eine neue radiologische Datierungsmethode für Gebäude, welche die Möglichkeiten der Altersbestimmung erheblich erweitern dürfte.

Der Kalkmörtel, wie er in historischen Bauwerken zum Einsatz kam, besteht aus karbonatischem Bindemittel und individuell zusammengesetzten Zuschlägen. Das Mengenverhältnis zwischen beidem kann dabei stark variieren. Seine Kenntnis ist deshalb eine erste Grundvoraussetzung, wenn man den Originalmörtel rekonstruieren und einen gleichwertigen Ersatz für die Restauration entwickeln will.

Das Verhältnis schwankt meist bei verschiedenen Objekten auf Grund abweichender Rezepturen. Bei ein und demselben Gebäude kann es aber auch zeitlich getrennte Bauphasen anzeigen. Ein gutes Beispiel bietet der »Schwarze Hof« in Eisenerz (Obersteiermark). Hier bewegt sich das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis bei gotischen Mörteln und Putzen zwischen 0,3 und 0,8. In barocken Gebäudeteilen liegt es dagegen deutlich unter 0,3 und in solchen aus der Wende vom 19. ins 20. Jahrhundert über eins.

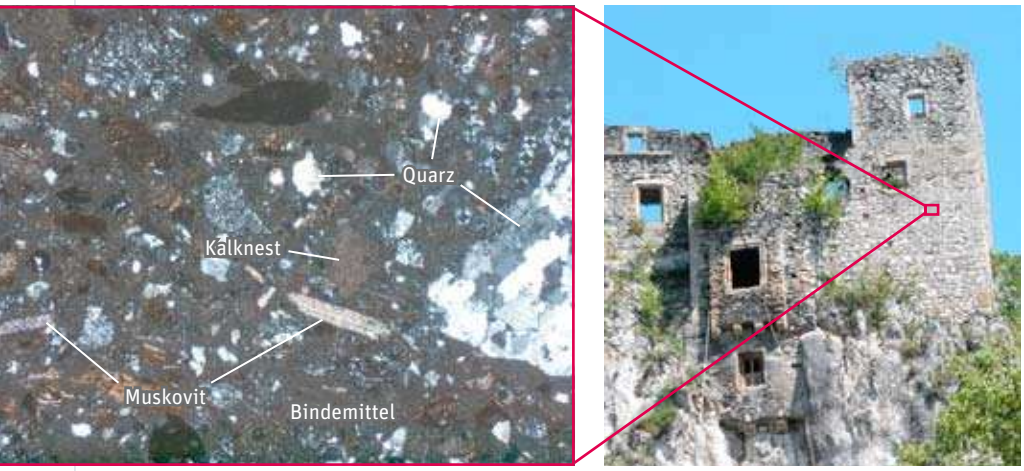
Wiederverwertetes Abfallprodukt

Auch die Art der Zuschlagstoffe variiert teils erheblich. So besteht ein charakteristischer Unterschied zwischen den untersuchten Putzen und Mörteln. Erstere enthalten üblicherweise feinkörnigen Kalzit und Dolomit, also Karbonate des Kalziums und Magnesiums. In Mörteln dominieren dagegen siliziumreiche Zuschläge wie Quarz, Glimmer und Feldspäte, die meist in Form von Sanden zugefügt wurden. Vereinzelt konnten wir auch die Minerale Granat, Chlorit und Zirkon identifizieren. Sie spiegeln spezielle Rohstoffvorkommen wider.

In einigen historischen Mörteln stießen wir auf zerkleinertes Ziegelmaterial. Vor allem römische Baumeister bevorzugten diese Art von Zuschlag. Damit konnten sie nicht nur ein Abfallprodukt wiederverwerten, sondern erzielten zugleich hohe Festigkeiten; denn das hydraulisch abbindende Ziegelmaterial härtet mit dem Bindemittel unter Aufnahme von Wasser auch ohne Luftzutritt aus, indem es einen hochstabilen Verbund aus untereinander vernetzten Mineralen bildet, zu denen außer Kalzit auch frisch entstandene Silikate gehören.

Im Mittelalter überwogen dagegen inaktive Zuschläge wie Bruchstücke von Kalkstein und Quarzsande. Erst in Putzen aus dem beginnenden Industriezeitalter kam mit Hochofenschlacke – einem typischen Abfallprodukt aus der Glas- und Erzverhüttung – wieder ein hydraulisches, in der Nässe abbindendes Material zum Einsatz.

Da das Bindemittel die Zuschlagstoffe miteinander verkittet, spielt seine Qualität eine große Rolle für Festigkeit ▷

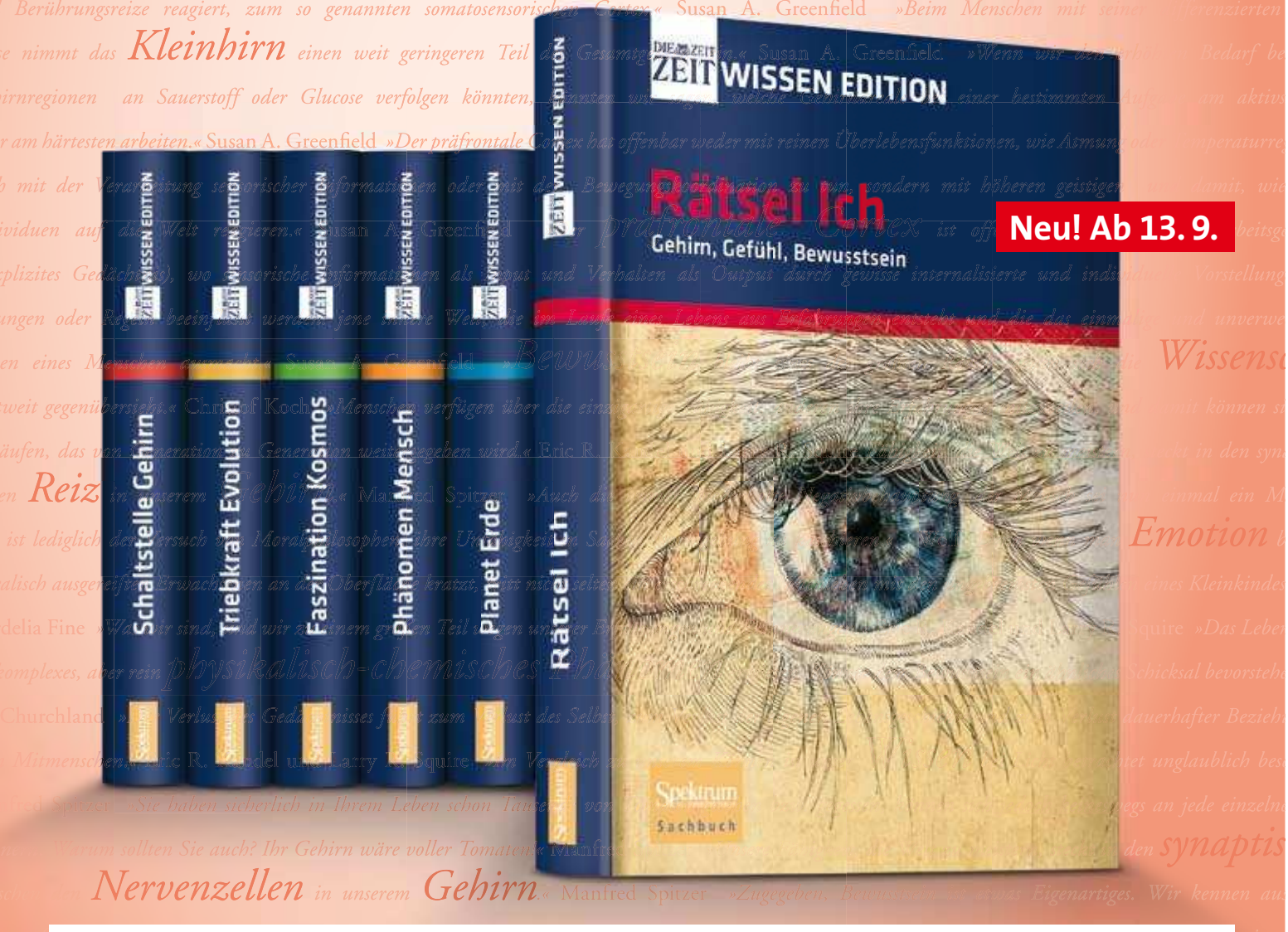


BEIDE FOTOS: BARBARA KOSEDNAR-LEGENSTEIN

Die Ruine Schachenstein bei Thörl (rechts) stammt aus dem Mittelalter. Die Zusammensetzung des Mauerwerkmörtels ließ sich mit Röntgen- und Elementanalysen ermitteln. Seine Mikrostruktur zeigt sich im Dünnschliffbild (links). Die feinkörnige Matrix aus untereinander vernetzten Kalzit-Kristallen stammt vom Bindemittel. Sie hält die Zuschläge zusammen, die aus Mineralen wie Quarz und Muskovit bestehen. Außerdem sind so genannte Kalknester zu erkennen: Bindemittelanreicherungen, die auf ein spezielles Herstellungsverfahren des Mörtels hindeuten.

Wissen, das die Welt erklärt.

Die neue ZEIT WISSEN Edition: Band 1 »Rätsel Ich«



Neu! Ab 13. 9.

Entdeckungsreisen in die Welt der Forschung

Wer ist Ich? Wie frei ist unser Wille? Haben nur wir ein Bewusstsein? „Rätsel Ich", Band 1 der neuen ZEIT WISSEN Edition, eröffnet neugierigen Lesern die Welt der Forschung und Wissenschaft auf völlig neue Weise. Wissenschaftler und Journalisten – alle ausgewiesene Autoritäten ihres Fachs – geben in dieser neuen Wissensbuchreihe verständlich und anschaulich Einblick in die aktuellen wissenschaftlichen Fragen unserer Zeit. So stillt die 6-teilige ZEIT WISSEN Edition Wissensdurst und Leselust zugleich.

Diese außergewöhnliche Lesebuchreihe – eine Gemeinschaftsproduktion von ZEIT und Spektrum Akademischer Verlag – ist ab dem 13. September erhältlich!

Vorschau auf die folgenden Bände:

Band 2: Planet Erde – Umwelt, Klima, Mensch
Band 3: Phänomen Mensch – Gesundheit und Krankheit
Band 4: Faszination Kosmos – Planeten, Sonnen, schwarze Löcher
Band 5: Triebkraft Evolution – Vielfalt, Wandel, Menschwerdung
Band 6: Schaltstelle Gehirn – Denken, Erkennen, Handeln

Das Besondere der Edition:

- Eine spannende Lesebuchreihe, die in die Welt der Wissenschaft entführt
- Lesen und mitreden: Aktuelle wissenschaftliche Diskussionen werden verständlich und erlebbar
- Prominente Wissenschaftler und namhafte ZEIT-Autoren enträtseln elementare Fragen unserer Welt

Mehr Informationen vorab finden Sie unter: www.zeit.de/editionen

www.zeit.de/editionen

Genießen Sie DIE ZEIT

BARBARA KOSEDNAR-LEGENSTEIN

Gemäß historischen Vorgaben bauten die Autoren zusammen mit Kollegen diesen Kalkofen in der Kartause Mauerbach nahe Wien nach. Darin führten sie bei Temperaturen zwischen 800 und 900 Grad Celsius einen dreitägigen Kalkbrand durch, wobei sie lokale Kalkvorkommen wie marinen Kalkstein, Sinterkarbonat, Dolomit und Marmor als Ausgangsmaterial verwendeten. Die Erkenntnisse aus anschließenden Materialanalysen lieferten die Grundlage für ihre Interpretationen historischer Mörtel und Putze.

▷ und Lebensdauer eines Mörtels. Im Gegensatz zum Zuschlag besteht es beim klassischen Kalkmörteln und -putzen praktisch nur aus einem einzigen Mineral: Kalzit, chemisch Kalziumkarbonat. Verunreinigungen durch Fremdelemente wie Strontium und Magnesium erlauben dabei Rückschlüsse auf die Herkunft des als Ausgangsmaterial verwendeten Kalksteins. Noch genauere Informationen über die Rohstoffquelle liefert das Verhältnis der beiden Strontium-Isotope der Masse 87 und 86. Insgesamt ergibt sich so ein Fingerabdruck des jeweiligen Bindemittels, mit dem es sich in Einzelfällen exakt einem bestimmten Kalksteinvorkommen zuordnen lässt.

Der Kalk wird zunächst zu Kalziumoxid gebrannt und dieses dann mit Wasser zu Kalziumhydroxid gelöscht. Das ist die Form, in der das Bindemittel im frisch aufgetragenen Mörtel oder Putz vorliegt. Mit der Zeit reagiert es mit Kohlendioxid aus der Luft unter Abgabe von Wasser zu untereinander vernetzten Kalzitkristallen und härtet so aus.

Manchmal treten im Putz oder Mörtel so genannte Kalknester auf: 0,1 bis drei Zentimeter große Anhäufungen von Bindemittel. Ihre Existenz verrät, dass die Baumeister das »Trockenlösch-Verfahren« anwendeten. Dabei werden alternierende Schichten aus Sand und Brandkalk angehäuft und anschließend mit Wasser übergossen. Der Sand hält dabei das Wasser zurück und gibt es nur in der für die chemische Reaktion benötigten Menge ab. So entsteht eine gebrauchsfertige Bindemittel-Zuschlag-Mischung, die der Maurer mit der Kelle senkrecht abträgt. Allerdings neigt sie zu Inhomogenitäten, sodass sich vereinzelte Kalziumhydroxid-Anreicherungen bilden, aus denen dann die Kalknester entstehen.

Radiokarbondatierung von Kalk

Das karbonatische Bindemittel kann aber noch mehr verraten. So erlaubt das Mengenverhältnis der stabilen Isotope des Kohlenstoffs (C-13/C-12) und des Sauerstoffs (O-18/O-16) Aussagen über die Brandqualität, den Verlauf des Abbindeprozesses und die Herkunft des dabei aufgenommenen Kohlendioxids.

Da beim Brennen grundsätzlich der gesamte Kohlenstoff und der meiste Sauerstoff entweichen, gehen deren ursprüngliche Isotopensignaturen aus dem Kalkstein verloren. Beim Abbinden reagiert das Kalziumhydroxid dann vorzugsweise mit solchen Kohlendioxid-Molekülen aus der Luft, in denen die leichteren Kohlen- und Sauerstoff-Isotope vorkommen. Dadurch sind im ausgehärteten Bindemittel die schwereren Atomsorten im Vergleich zum Ausgangskalk deutlich abgereichert. Relikte aus unzureichendem Kalkbrand, bei denen das nicht zutrifft, lassen sich so erkennen.

Fossile Brennstoffe enthalten besonders wenig Kohlenstoff-13; denn die Lebewesen, aus deren Biomaterial sie hervorgegangen sind, reicherten gleichfalls das leichtere C-12 an. Ein extrem niedriges C-13/C-12-Verhältnis in Mörteln aus dem 19. Jahrhundert zeigt somit an, dass das Kohlendioxid zum Abbinden damals aus der Verbrennung von Kohle stammte.

Interessant ist ein weiterer Befund: Im Idealfall reichern sich die schweren Kohlen- und Sauerstoff-Isotope entlang einer Mörtelfuge kontinuierlich von innen nach außen an. Diese charakteristische Verteilung dokumentiert einen ungestört fortschreitenden Abbindeprozess durch die Diffusion von gasförmigen Kohlendioxid-Molekülen in die Mörtelpaste.

Organisches Material lässt sich bekanntlich über seinen Gehalt an radioaktivem Kohlenstoff-14 datieren. Wegen des Abbindevorgangs gelingt eine solche Altersbestimmung, wie wir herausfanden, aber auch bei Putzen und Mörteln. Das eröffnet ganz neue Perspektiven – erlaubt es doch, die Entstehungszeit eines Gebäudes auch dann festzustellen, wenn sich keine organischen Reste wie etwa Holzfasern im Mauerwerk finden.

Eine wichtige Rolle spielen dabei die schon erwähnten Kalknester. Bei ihrer Bildung haben sie auch Kohlendioxid aus der Luft aufgenommen, das den für die Atmosphäre charakteristischen Anteil an Kohlenstoff-14 aufwies. Dieses radioaktive Isotop ist anschließend mit einer bekannten Halbwertszeit zerfallen und kann so wie eine innere Uhr die seither verflossene Zeit anzeigen. Allerdings gilt es zunächst sicherzustellen, dass das Nest nicht aus ungenügendem Kalkbrand stammt. Dazu muss man auch das Verhältnis der Isotope C-13 zu C-12 und O-18 zu O-16 prüfen.

Mit dieser Methode konnten wir unter anderem das Abbindealter eines Mörtels aus der römischen Siedlung Flavia Solva (Steiermark) bestimmen. Demnach wurde das untersuchte Siedlungsgebäude etwa 70 n. Chr. errichtet. Im Mörtel eingebettete Holzfasern ergaben dagegen ein deutlich höheres Alter: Sie stammten aus der Zeit um 170 v. Chr. Die Diskrepanz lässt darauf schließen, dass es damals anscheinend üblich war, Holzmaterialien wiederzuverwenden. Deren Datierung allein kann daher in die Irre führen.

Barbara Kosednar-Legenstein ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Angewandte Geowissenschaften der Universität Graz, das **Martin Dietzel** als Professor für Mineralogie leitet.

Die Macht fremder Blicke

Wie unter den Augen der anderen Altruismus entsteht

»Die Hölle, das sind die anderen«, heißt es in dem Stück »Bei geschlossenen Türen« von Jean-Paul Sartre. An drei Personen, die auf ewig in einen Raum gesperrt sind, exemplifiziert der Existenzialist seine Grundthese: Der Mensch ist für sich genommen ein absolut freies Subjekt; erst durch den Blick anderer Personen wird er zum fremdbestimmten Objekt.

Der Existenzialismus stand unter dem Schock der Weltkriegsgräuel und Sartres Stück erschien 1947. Das erklärt seine düstere Grundstimmung. Zieht man diesen zeitbedingten Pessimismus ab, erweist sich Sartres These als erstaunlich haltbar. Positiv gewendet, lautet die Frage: Woher kommt es, dass Individuen sich sozial verhalten, statt ihre Freiheit auf Kosten anderer hemmungslos auszuleben? Wie Beobachtungen tierischen und menschlichen Verhaltens zeigen, spielt dabei tatsächlich der Blick der Artgenossen eine entscheidende Rolle. Zahlreiche neue Belege dafür liefern der Verhaltensforscher Manfred Milinski vom Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie und die Wirtschaftswissenschaftlerin Bettina Rockenbach von der Universität Erfurt in einer aktuellen Veröffentlichung *(Science, Bd. 317, S. 464)*. Zum Beispiel säubert der Lippenputzerfisch seinen Wirt brav von Parasiten, solange andere Wirtsfische zusehen. Unbeobachtet aber beißt er lieber nahrhafte Stücke aus der Haut seines Kunden.

Der Blick der anderen nötigt auch uns Menschen in sozialen Situationen Altruismus auf. Ohne diese Augenkontrolle lassen wir uns in der Regel gehen. Wer bei einem so genannten Diktatorexperiment selbstherrlich Geld verteilen – oder behalten – darf, verhält sich meist äußerst knauserig, solange er anonym bleibt, wird aber unter den Augen der anderen zum großzügigen Spender. So erkläre ich mir auch, warum Reisende, die wie Japaner zum Beispiel aus einer sozial sehr stark kontrollierenden Kultur stammen, in der Fremde viel ungezwungener agieren: Sie fühlen sich dort nicht so beobachtet wie daheim. Noch wesentlich krassere Beispiele für »die Sau rauslassen«, wenn keiner zusieht, kennt wohl jeder.

Das führt zu der unmoralischen Frage: Wie schütze ich mich vor dem Blick der anderen, damit ich meinem Egoismus möglichst freien Lauf lassen darf? Beim Maskenball genügt es schon, die eigene Augenpartie zu kaschieren, beim Banküberfall wird gern zur Skimütze gegriffen.

Milinski und Rockenbach sprechen in diesem Zusammenhang von einem regelrechten Wettrüsten zwischen Beobachter und Observiertem. Wer das typische Normalverhalten eines anderen kontrollieren möchte, wird das wohl lieber heimlich tun, damit er sicher sein kann, dass die beobachtete Selbstlosigkeit auch wirklich »echt sozial« motiviert ist und im Wissen um den Blick des Beobachters nicht nur ausnahmsweise vorgespielt wird. Umgekehrt wird der Beobachtete, sofern er die Augen des anderen auf sich ruhen fühlt, den Blick nicht erwidern, sondern so tun, als fühle er sich unbeobachtet, damit sein Handeln nicht durch soziale Kontrolle aufgezwungen, sondern echt wirkt.

Im Verlauf solchen »Wettrüstens« zwischen Ertappen und Verbergen, Überwachung und Schauspielerei löst sich der Altruismus allmählich vom kontrollierenden Blickzwang. Im Hin und Her des »Ich sehe, dass du siehst, dass ich sehe, dass du mich siehst« wird der andere Blick immer anonymer und abstrakter. Am Ende steht das allsehende Auge, wie es als christliches Gottessymbol oder auf der Dollarnote erscheint. Es besagt: Auch wenn gerade kein Mensch dein Handeln beobachtet, der Allerhöchste sieht dich doch. So hat uns der Blick des anderen flugs von Sartres Hölle durch Tier- und Menschenwelt zum Himmel geführt.

Michael Springer

4th
International
Meeting

Stem Cell Network
North Rhine Westphalia

October 8-9, 2007
Düsseldorf, Germany

_ sessions in SC self renewal, biological niche, cancer, aging and regeneration, regulation of the SC state and translational technologies

_ lectures by Peter Andrews, Margaret Goodell, Ron McKay, Stuart Orkin, Luis Parada, Michael West and many more

_ poster session

_ company exhibition

_ satellite symposium ‚Reprogramming of Somatic Cells for the Therapy of Heart Disorders', Oct. 9-10

_ lectures by experts in ethical and legal issues

Stem Cell Network
North Rhine Westphalia

Congress attendance is free of charge.

Please register at:
www.congress.stemcells.nrw.de

Ministry of Innovation, Science, Research and Technology of the German State of North Rhine-Westphalia

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Es war einmal in Südamerika

Riesenfaultier und Beutelsäbelzahnkatze – in uraltem Vulkangestein eingeschlossene Fossilien helfen, die Evolution der Säuger Südamerikas zu verstehen.

RAUL MARTIN

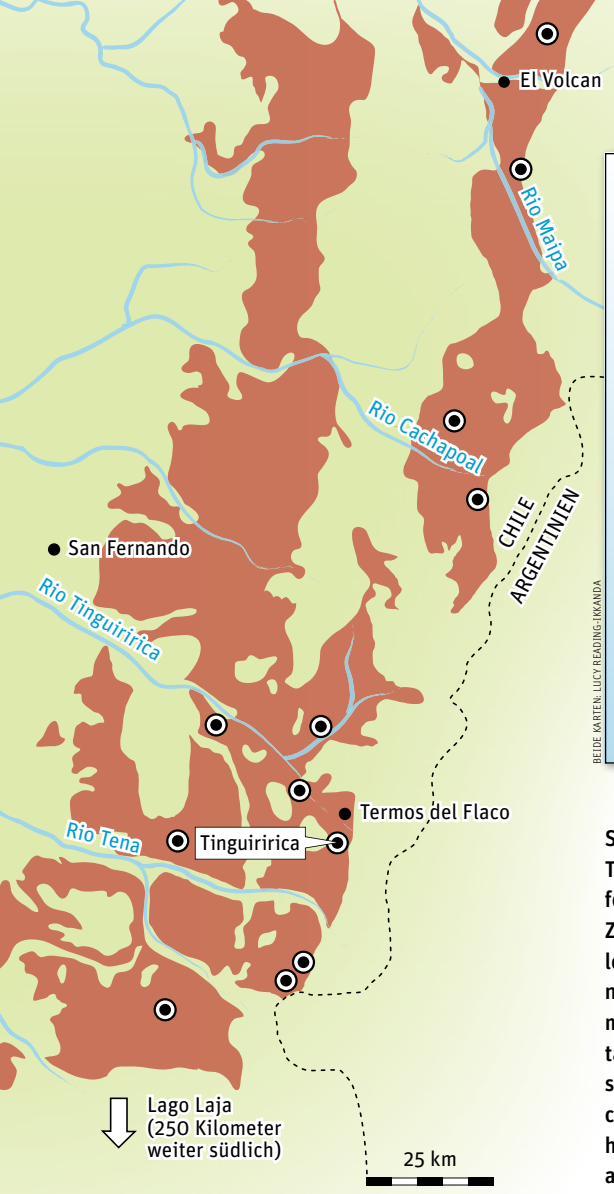
Von John J. Flynn, André R. Wyss und Reynaldo Charrier

Am Rand einer weiten Graslandschaft äsen urtümliche Huftiere, manche Pferden, andere Antilopen ähnlich. Ein Riesenfaultier lässt sich frisches Blattwerk schmecken, ein mausähnliches Beuteltier knabbert an Samen. Doch plötzlich explodiert einer der schneebedeckten Vulkane am Horizont und eine Lawine aus Erdreich und Asche rast seine Hänge hinab, alles Leben begrabend.

Im Lauf von Jahrmillionen türmen sich Sedimente und vulkanische Gesteine zum Gebirge auf, werden ein Teil der heutigen Anden Zentralchiles. Unser Team stieß 1988 auf die ersten versteinerten Knochen, als es im Hochtal des Rio Tinguiririca, in der Nähe der Grenze zu Argentinien, nach Dinosaurierfossilien suchte. Seitdem kommen wir fast jedes Jahr wieder und haben an ein paar Dutzend Fundstellen über 1500 Fossilien prähistorischer Säugetiere frei gelegt.

Doch nicht nur das reiche Vorkommen lohnt die Mühe. Zu unserer Verblüffung datierten unsere Laboruntersu- ▷

Noch äsen diese südamerikanischen Ursäugetiere friedlich nebeneinander, doch bald wird eine gewaltige Lawine aus Vulkanasche und Schlamm ihr Tal meterhoch bedecken.



Seitdem die Autoren 1988 im Tinguiririca-Tal auf eine wahre Fundgrube von Säugerfossilien stießen, haben sie in den Anden Zentralchiles mehr als ein Dutzend Fundstellen in vulkanischen Sedimenten der so genannten Abanico-Formation (braun) ausgemacht, die auf einer Fläche von mehreren tausend Quadratkilometern alpiner Landschaft zu Tage tritt. Niemand hätte einen solchen Schatz in diesem Gestein erwartet. Bisher stammen die meisten Säugerfossilien aus dem weit im Süden des Kontinents gelegenen Patagonien.

In Kürze

- In den Anden Zentralchiles wurden **mehr als 1500 Säugetierfossilien** entdeckt, darunter eine beachtliche Anzahl zuvor unbekannter Arten sowie die ältesten bekannten Nagerfossilien des Kontinents.
- Die vierzig bis zehn Millionen Jahre alten Fossilien **schließen eine Lücke in der Evolutionsgeschichte** der eigentümlichen Säugerfauna Südamerikas.
- Einige Fossilien belegen, dass diese Region vor 32 Millionen Jahren **zu großen Teilen mit Gras bewachsen** war; dieser Vegetationstyp wäre somit 15 Millionen Jahre älter als andernorts auf der Welt.

▷ chungen die Tiere auf ein Alter von vierzig bis zehn Millionen Jahren vor heute, eine Zeit, aus der man bislang von Südamerika kaum Funde hatte. Einige dieser einzigartigen Fossilien werfen deshalb Licht auf ein bisher ungeklärtes Kapitel in der Geschichte südamerikanischer Säugetiere und Ökosysteme.

Im Wesentlichen beruht unser Wissen über die prähistorischen Säugetiere Südamerikas auf Fossilien aus weiter südlich gelegenen Gebieten des Kontinents, vor allem Patagonien. In diesen Gegenden treten viele fossilienhaltige Gesteinsschichten an die Oberfläche – Tonschiefer, Sandstein und andere Sedimentgesteine aus ehemaligen Flussbetten und Überschwemmungszonen. Die Bergregionen Chiles hatten Paläontologen lange ignoriert, da das Gestein meist vulkanischen Ursprungs war. Lava und anderes Eruptionsmaterial galten als zu heiß, als dass sich darin Lebewesen hätten erhalten und versteinern können.

Wir beschlossen dennoch, im Tinguiririca-Tal zu suchen, denn man hatte dort Fußspuren von Dinosauriern entdeckt. Vielleicht ließen sich ja doch auch Knochen der riesigen Echsen finden, vielleicht sogar Fossilien ihrer winzigen Zeitgenossen – nur spitzmausgroße frühe Säugetiere. Geologen gingen damals davon aus, dass der Hauptgebirgsrücken der chilenischen Anden mindestens 65 bis 100 Millionen Jahre alt ist, also gegen Ende des Erdmittelalters (Mesozoikum) entstand, der Blütezeit der Reptilien.

Zunächst unternahmen wir 1988 zu viert eine einwöchige Vorexkursion. Am letzten Tag teilten wir uns auf, um die steil abfallenden Felshänge links und rechts des Flusses zu inspizieren. Bald stießen die beiden am Nordufer Arbeitenden zwar auf die Sedimentschicht mit den Saurierspuren, doch an Fossilien fanden sie nur Fische, Ammoniten und einige andere Meeresbewohner. Ähnlich erging es den Kollegen, bis sie am Spätnachmittag fast tausend Meter über der Talsohle ein paar versteinerte Knochen und Zahntrümmer erspähten, die aus einem großen Stück rötlich braunem Vulkangestein herausschauten. Es waren Knochen landbewohnender, etwa ponygroßer Wirbeltiere.

Das war verwirrend. Was für Tiere konnten das sein? Besondere Dinosaurier oder gar eine noch unbekannte Tiergruppe des Mesozoikums? Zudem besagte das

komplexe, differenzierte Gebiss, dessen vielflächige Backenzähne mit ihren hohen Kronen etwas völlig anderes: Dies waren offenbar Säugetiere, doch viel zu groß und in ihrer Entwicklung viel zu weit fortgeschritten, als dass sie vor mehr als fünfzig Millionen Jahren gelebt haben konnten. Offenbar hatten die Geologen das Alter der Gesteinsschichten ziemlich falsch eingeschätzt. Tatsächlich bestätigten spätere Untersuchungen, dass die neuen Fossilien mitten aus dem Känozoikum stammten, jener immer noch andauernden Ära, die nach dem Aussterben der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren begann (heute weiß man, dass die Vögel Nachkommen der Theropoden sind, einer Gruppe räuberischen Dinosaurier, zu denen auch *T. rex* gehörte).

Im Januar darauf kehrten wir zu siebt erwartungsfroh und mit voller wissenschaftlicher Ausrüstung ins Tinguiririca-Tal zurück. Auf der Südhalbkugel herrschte Sommer, die Schneeschmelze im Hochgebirge war so weit abgeklungen, dass die wie jeden Winter zerstörten schmalen Zufahrtswege wieder hergerichtet worden waren. Nachdem wir unsere Packtiere von ihren Lasten befreit hatten, schlugen wir das Lager an einem kleinen Bach auf und begaben uns unverzüglich auf die Suche. Zu unser aller Freude stießen wir schon wenige Minuten später auf einige außerordentliche Knochen und Zahnfragmente.

Mehr als 300 Fossilien

Aus einem kartoffelgroßen Felsbrocken ragte ein Schädel heraus, der zweifellos einem Säugetier gehörte – was man neben anderen typischen Merkmalen an dem nur aus einem Knochenpaar bestehenden Unterkiefer erkennen konnte (der Unterkiefer eines Reptils setzt sich aus etlichen Einzelknochen zusammen). Dieses Tier beschrieben wir später als eine neue Art der Notoungulaten – einer einst arten- und formenreichen Gruppe von Huftieren, die vor allem in Südamerika lebten. Sie waren Pflanzenfresser, ihre größten Vertreter wurden so groß wie heutige Nilpferde, die kleinsten nicht größer als Hasen. Diese Notoungulaten starben vor knapp einer Million Jahren aus. Unsere neue Art ähnelte wahrscheinlich einer heutigen Antilope, während die im Jahr zuvor entdeckten Zähne von einem Notoungulaten stammten, der wohl einem Nashorn glich. Insgesamt sollten wir während der ersten drei Ausgrabungsjahre im Tal von Tinguiririca mehr als dreihundert verschiedene Tiere entdecken, darunter Beuteltiere, ein urtümliches Faultier, Gürteltiere und einen chinchillaähnlichen Nager.

Ganz offenbar waren wir auf etwas Außergewöhnliches gestoßen. Denn die Vorfahren der noch heute besonderen südamerikanischen Arten hatten sich entwickelt, als der Kontinent eine riesige Insel war. Fast achtzig Millionen Jahre lang war Südamerika von allen anderen Landmassen isoliert, ein Bruchstück des einstigen Kontinents Gondwana. Erst vor etwa 3,5 Millionen Jahren bildete sich die Landbrücke zu Nordamerika. Gerade weil dieser Kontinent so lange von anderen Landmassen getrennt war, erwies er sich als erstrangiges Experimentierfeld für die Säugetierevolution, nicht zuletzt auf Grund notwendiger Anpassungen an klimatische Veränderungen. So entstanden Säuger, die auf wahrhaft einzigartige Weise an die Ökosysteme der Rieseninsel angepasst waren. Sie nahmen bizarre Formen an: hüpfende Beuteltiere, Beutelsäbelzahnkatzen, Verwandte heutiger Gürteltiere mit stachelbewehrten Schwanzkeulen, Nager so groß wie Bären, Faultiere, von denen einige modernen Elefanten an Größe gleichkamen.

Die Bergregionen Chiles hatten Paläontologen lange ignoriert, nun erwiesen sie sich als Schatzkammer

Dieses Wissen schöpften Paläontologen aus Fossilienfunden in Patagonien und an anderen Stellen des Kontinents, doch es blieb lückenhaft, entscheidende Informationen fehlten. So wussten wir beispielsweise, dass Faultiere und Ameisenbären zusammen mit einer Reihe dann ausgestorbener Stammeslinien wie den Notoungulaten und einigen Beutel- ▷

Die neuen Arten

Während unserer insgesamt fünf Sommer dauernden Grabungen im Tinguiririca-Tal fand unser Team Fossilien von 25 Säugerarten, von denen einige auf dem Bild auf S. 26 zu sehen sind. Diese Urtiere, die meisten bislang unbekannt, lebten vor etwa 32 Millionen Jahren. Zu dieser »Tinguiririca-Fauna« zählen die ältesten südamerikanischen Nagetiere, unter anderem auch ein chinchillaähnlicher Urnager ①, der zurzeit noch keinen wissenschaftlichen Namen trägt. Die Fossilien einer neuen Art des pferdeähnlichen *Eomorphippus* ② und die Art *Santiagorothia chilensis* ③ sind die ältesten Vertreter zweier Gruppen der Notoungulaten, ausgestorbener südamerikanischer Huftiere. Zu diesen gehören auch die so genannten Urklippschliefer (Archaeohyraciden) wie das hier abgebildete *Archaeotypotherium tinguiriricaense* ④. Einzig in Tinguiririca gefunden wurde das Riesenfaultier *Pseudoglyptodon chilensis* ⑤, das eng mit modernen Faultieren verwandt ist, sowie das an eine Spitzmaus erinnernde Beuteltier *Klahnia charrieri* ⑥.

Einwanderer aus Afrika

Neuweltaffen und Meerschweinchenverwandte (eine Nagetiergruppe, zu der unter anderem die heutigen Wasserschweine, Chinchillas und Anverwandte gehören) trafen vor etwa 25 Millionen Jahren auf dem Kontinent ein, als dieser noch eine riesige Insel war. Die Fossilienfunde aus Zentralchile stützen die Hypothese, beide Tiergruppen stammten aus Afrika.

Affe / *Chilecebus carrascoensis*
Dieser nur fünf Zentimeter lange Schädel ① gehörte einem kleinen Affen, der möglicherweise einem heutigen Lisztäffchen ähnelte ②.

Nager / noch ohne Artnamen
Das zwei Zentimeter lange Kieferfragment ③ ist eines der ältesten Nagerfossilien Südamerikas. Vermutlich sah das Tier wie ein Aguti ④ aus.

SCHÄDEL: JOHN WEINSTEIN, FIELD MUSEUM OF NATURAL HISTORY; KIEFERFRAGMENT: MARLENE DONNELLY, FIELD MUSEUM OF NATURAL HISTORY; ZEICHNUNGEN (2+4): RAÚL MARTIN

▷ tiergruppen vor über vierzig Millionen Jahren entstanden waren. Zehn Millionen Jahre später war die Evolution in eine zweite Phase getreten, so viel wussten Paläontologen bereits. Aus der Zeit des Übergangs jedoch war bislang kein Fossil zum Vorschein gekommen. Umso aufgeregter waren wir, als immer klarer wurde, dass die Tiere von Tinguiririca genau in dieser bis dahin unbekannten Zeitspanne gelebt haben müssen.

Experten hatten allerdings schon den Verdacht gehegt, dass sich viele der typisch südamerikanischen Säugerformen während dieser »fossilienfreien« Zeitspanne geradezu explosionsartig in zahlreiche neue Linien aufgespalten hatten. Tatsächlich finden sich in unserer Fossiliensammlung mindestens 25 – zumeist bis dahin unbekannte – Säugerarten, darunter die frühesten Nachweise mehrerer Notoungulatengruppen (siehe Kasten vorige Seite).

In derselben Zeit erreichten die ersten Affen und Nagetiere den Kontinent. Zu unseren bedeutendsten Entdeckungen zählt deshalb auch das Fossil des ältesten bekannten südamerikanischen Nagers. Denn über den Ursprung bestimmter Arten wie etwa von Wasserschweinen (Capybaras) und Chinchillas streitet die Fachwelt. Sie werden der Teilordnung der Meerschweinchenverwandten (wissenschaftlich Caviomorpha) zugerechnet und stellen die älteste Gruppe südamerikanischer Nagetiere dar. Ratten, Mäuse und deren Verwandte wanderten erst viel später ein, als Süd- und Nordamerika über die Meerenge von Panama miteinander verbunden waren. Einstimmigkeit herrscht aber darüber, dass die Caviomorpha nicht in Südamerika entstanden, sondern dort erst vor 55 bis 25 Millionen Jahren auftauchten. Damals war der Kontinent eine riesige Insel. Ein paar jüngere Fossilien sprachen für eine Herkunft aus Afrika, doch der kürzere Weg aus Nordamerika, möglicherweise über eine karibische Inselkette, erschien einigen Forschern wahrscheinlicher.

Wir verglichen anatomische Details des Tinguiririca-Nagers mit Nagetierfossilien anderer Kontinente. Aufschlussreich war vor allem die Form der Zähnchen, die immer noch im Unterkiefer verwurzelt waren, denn sie verriet uns, dass die Backenzähne im noch unentdeckten Oberkiefer fünf deutliche Leisten gehabt haben müssen. Das entspricht den Verhältnissen bei afrikanischen Nagetieren jener Zeit, während nordamerikanische auf den oberen Molaren nur vier Leisten hatten. Da man in Nordamerika zudem keinen fossilen Nager eindeutig den Meerschweinchenverwandten zuordnen kann, halten wir es für sehr wahrscheinlich, dass die Vorfahren unseres Tiers aus Afrika stammten.

Möglicherweise gelangten sie auf Baumstämmen oder anderem Treibgut nach Südamerika; das ist die in solchen Fällen gern herangezogene, da plausibelste wissenschaftliche Erklärung (Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 26). Die Idee einer Odyssee über die Ozeane mag weit hergeholt erscheinen, doch vor gut 32 Millionen Jahren war der Südatlantik an seiner schmalsten Stelle nur etwa 1400 Kilometer breit – also halb so breit wie heute. Zudem gab es in den Tropen damals gelegentlich sehr starke Meeresströmungen von Ost nach West. Unter diesen Umständen wäre eine Überquerung innerhalb von etwa zwei Wochen möglich gewesen; in dieser Zeit verfielen die Tiere vielleicht in einen Torpor, eine durch Stress ausgelöste Apathie mit drastisch reduziertem Stoffwechsel. Vielleicht mussten sie nicht einmal 14

Tage am Stück durchhalten, denn weil sich damals in der Antarktis eine gewaltige Eisdecke bildete, sank der Meeresspiegel, ozeanische Vulkangipfel mögen als Inseln aus dem Meer aufgetaucht sein.

Harte Kost – harte Zähne

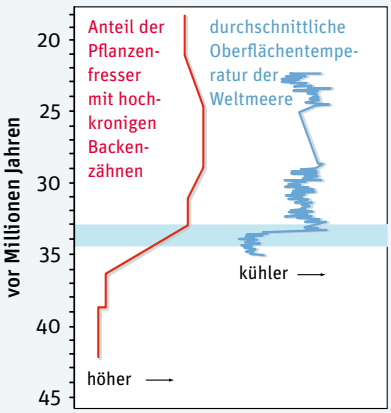
Dank einer neuen und außerordentlich genauen Datierungsmethode, bei der winzige Mengen Argongas analysiert werden, die im Kristallgitter fossilhaltigen Gesteins eingeschlossen sind, fanden wir heraus: Die Säugetiere von Tinguiririca lebten zwischen 33 und 31,5 Millionen Jahren vor unserer Zeit. In dieser Phase der Erdgeschichte wurde das Klima weltweit kühler und trockener. Wie passte sich die Lebenswelt Südamerikas diesen Veränderungen an?

Zwar haben wir keinerlei pflanzliche Fossilien in den Gesteinsschichten gefunden, doch es gibt indirekte Hinweise auf das Ökosystem ihrer Zeit. Offenbar hatte es sich kurz zuvor drastisch verändert. Denn die meisten der älteren, etwa aus Feuerland bekannten, südamerikanischen Säugetiere der Zeitspanne vor 65 bis 34 Millionen Jahren waren Pflanzenfresser, die in üppigen tropischen Wäldern lebten und sich von Laub und Kräutern ernährten. Das bestätigen nicht nur etliche Pflanzenfossilien aus jener Zeit, sondern auch fossile Gebisse: Säugetiere, die vornehmlich weiche Pflanzenkost zu sich nehmen wie wir Menschen, besitzen charakteristischerweise Zähne mit flachen Kronen, deren Kaufläche nur von einer dünnen Schicht schützendem, hartem Schmelz bedeckt ist, der gerade mal bis zum Zahnfleischrand reicht.

Im Gegensatz dazu verfügten viele Pflanzenfresser aus dem Tinguiririca-Tal über ein Gebiss mit extrem hohen Kronen, deren Schmelz über den Zahnfleischrand hinaus fast bis zu den Wurzelspitzen reichte. Der Zweck ist klar: Ein ▷

Aufschlussreiche Backenzähne

Das Gros der 32 Millionen Jahre alten Pflanzenfresser aus dem Tinguiririca-Tal besaß Backenzähne mit hohen Kronen: charakteristisch für Tiere, die hartes Gras zermalmen müssen. In den Epochen davor war Südamerika überwiegend von dichten Wäldern bedeckt, dementsprechend hatten deutlich weniger Pflanzenfresser ein solches hartes hochkroniges Gebiss (rote Kurve in der Grafik). Eine globale Klimaveränderung vor 34 Millionen Jahren, die mit kühlem und trockenem Wetter einherging, könnte den Vegetationswandel erklären.



JOHN J. FLYNN, ANDRÉ R. WYSS UND REYNALDO CHARRIER

hochkronige Backenzähne
Bei diesem Pflanzenfresser von Tinguiririca reichte der schützende Zahnschmelz über den Rand des Zahnfleischs hinab bis zu den Wurzelspitzen und schützte gegen Verschleiß durch hartes Gras.

niederkronige Backenzähne
Im Gegensatz dazu schützte der Zahnschmelz bei diesem älteren urzeitlichen Pflanzenfresser aus Chile nur oberhalb des Zahnfleischs.

ALLISON SMITH, AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY

wichtige **online** **adressen**

academics.de –
das Karriereportal der Wissenschaft
www.academics.de

arceoTon –
der Podcast zur Archäologie
www.arceoton.de

ingenieurkarriere.de –
der Stellenmarkt für Ingenieure
www.ingenieurkarriere.de

Kernmechanik –
Optimiertes Modell:
Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

▷ solcher Aufbau schützt besser gegen Abrieb. Bei den Pflanzenfressern von Tinguiririca bildeten sich derartige Zähne mit ziemlicher Sicherheit deshalb, weil ihre Futterpflanzen sehr viele Silikate enthielten – beispielsweise haben Rinder, Antilopen und Pferde die gleiche Strategie entwickelt, Tiere also, die sich auf offenem Grasland und Savannen überwiegend von Hartgräsern ernähren.

Auf steilen Pfaden und per Hubschrauber zu den Fundstätten: »Je beschwerlicher der Weg, desto lohnender die Fossilien«

Auffällig ist auch, dass zwei Drittel »unserer« Arten ein solches widerstandsfähiges Gebiss besaßen, ein wesentlich höherer Anteil als bei Säugetieren heutiger offener Lebensräume, wie etwa des Mittleren Westens Nordamerikas.

Demnach fanden die Pflanzenfresser von Tinguiririca ihr Futter wohl auf Grassteppen. Allerdings stützt nicht allein das Gebiss diesen Schluss. Unser ehemaliger Doktorand Darin Croft, heute Professor an der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio), setzte spezielle statistische Verfahren ein, um die prähistorischen Ökosysteme zu rekonstruieren. Er analysierte die Verteilung der Artenzahlen in Relation zu Körpergrößen und Umweltparametern wie Niederschlag und Vegetation. Das Resultat bestätigte: Die Tinguiririca-Fauna ähnelte mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit heutigen Tiergemeinschaften in trockenem Grasland, das von vereinzelten Wäldchen oder Hainen durchsetzt wird wie die Dornbuschsavannen Afrikas oder die Chaco-Region Südamerikas.

Unser Befund war durchaus eine Überraschung, denn die ersten offenen Graslandzonen kamen auf den anderen Kontinenten nach bisherigem Wissen erst vor 18 Millionen Jahren auf. Dass in Tinguiririca bereits 15 Millionen Jahre früher Grassteppen wuchsen, mag nicht allein der damalige Klimawandel bewirkt haben, sondern auch die Auffaltung der Andenkette – das Land geriet in den Regenschatten. Steppenpflanzen kamen mit Kühle und Trockenheit wohl besser zurecht als Regenwälder. Allerdings bedarf diese These noch weiterer wissenschaftlicher Prüfung.

Im Frühjahr 1994 erlebten wir eine zunächst weniger angenehme Überraschung: Die Schäden an der Zufahrtsstraße zu unserer Fundstätte waren nach der Schneeschmelze noch nicht behoben. Kurzerhand machten wir aus der Not eine Tugend und erkundeten umliegende Täler. Auch dort traten Felsschichten des gleichen vulkanischen Gesteins wie im Tal von Tinguiririca zu Tage, auf Tausenden von Quadratkilometern. Inzwischen wissen wir, dass jener gewaltige Vulkanausbruch, dem wir die einzigartigen Säugerfossilien verdanken, keine einmalige und lokal begrenzte

Wann entstanden die Anden?

PHILIPP GANS, UNIVERSITY OF CALIFORNIA SANTA BARBARA

Fossilienhaltige Schichten, himmelwärts geschoben und beinahe in die Senkrechte gekippt, vermitteln dem Betrachter, wie gewaltig jene tektonischen Kräfte waren, die schon seit Jahrmillionen auf Zentralchile einwirken. Die abgebildeten Steilhänge liegen in der Nähe des Laja-Sees, etwa 300 Kilometer südlich des Tinguiririca-Tals.

Das überraschend geringe Alter der Ursäuger aus Zentralchile irritiert die Geologen. Denn die Auffaltung der Anden sollte vor mehr als hundert Millionen Jahren erfolgt sein. Die Bildung der mit mehr als 7000 Kilometern weltweit längsten geschlossenen Gebirgskette der Welt beruht auf dem noch heute anhaltenden Abtauchen einer ozeanischen Platte unter den Kontinent. Das geschmolzene Gestein steigt auf, verdickt die Kruste und drückt sie nach oben. Dabei verlagerte sich dieser Prozess im Lauf der Zeit immer weiter landeinwärts. Die Datierung der neuen Säugerfossilien zeigt, dass die Gebirgsbildung in Zentralchile wohl erst vor 15 bis 18 Millionen Jahren eingesetzt hat. Sie erfolgte in Episoden und dauert heute noch an. Klar ist nun auch, dass während der vulkanischen Phasen Becken entstanden, in denen sich Sedimente sammelten. In diesen flachen Bereichen bildeten sich die im Artikel beschriebenen urzeitlichen Ökosysteme der Region.

ANDRÉ R. WYSS

DARIN CROFT, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY

Naturkatastrophe gewesen war. Lava, Asche und Schlamm begruben vielmehr im Lauf von Millionen Jahren immer wieder die Landschaft unter sich. Jedes Mal überdeckten neue Lagen aus Lava und Sedimenten die früheren. Insgesamt entstand so eine mehr als drei Kilometer dicke Gesteinsschicht, die dann in späteren Zeiten unter dem Druck aufeinanderstoßender tektonischer Platten weit in die Höhe geschoben wurde. Inzwischen untersuchen wir die gesamte Phase von vor zehn bis vierzig Millionen Jahren. Seitdem sehen wir die Geschichte dieser Region in neuem Licht.

Neues von den Neuweltaffen

Einer unserer wohl bedeutendsten Funde aus jüngster Zeit stammt von einer Ausgrabungsstelle im Abflussbecken des Rio Cachapoal, etwa 100 Kilometer nördlich des Rio Tinguiririca. Es handelt sich um den vollständigsten bisher gefundenen Schädel eines frühen Neuweltaffen, fünf Zentimeter lang; beide Augenhöhlen sowie alle Zähne des Oberkiefers sind vollständig erhalten. Das Tier dürfte höchstens ein Kilogramm gewogen haben.

Dieser Primat, der den wissenschaftlichen Namen *Chilecebus carrascoensis* erhielt, ähnelt modernen Neuweltaffen, zu denen etwa die Krallenaffen gehören. Ähnlich wie bei den Meerschweinchenverwandten hatten die Fachleute lange darüber diskutiert, ob diese Bewohner Südamerikas von Nordamerika oder Afrika eingewandert waren. Anatomische Details am Schädel und an den Zähnen von *Chilecebus carrascoensis* sprechen wieder für Letzteres. Offenbar haben auch seine Vorfahren den Atlantik überquert – auf welche Weise, werden wir wohl nie genau erfahren.

Die Fossilien der Tinguiririca-Fauna, insbesondere auch solche exquisiten Funde wie unser frühes Neuweltäffchen oder andere aktuelle Entdeckungen in Zentralchile, haben dazu beigetragen, dass man vulkanische Sedimente nicht mehr als mögliche Fundstätten für Fossilien ausschließt; ganz im Gegenteil enthalten diese Gesteine sogar ausgezeichnet erhaltene Versteinerungen. Sie gelten heute als vorrangige Informationsquellen über die Geschichte der Säugetiere Südamerikas, eines Kontinents, der sich auf Grund seiner langen Isolation als regelrechtes Labor der Evolution entpuppt.

Im Lauf der Jahre haben wir eine Art »Fossilienblick« für viel versprechende Gesteinsformationen entwickelt und erkennen diese manchmal schon aus mehreren Kilometern Entfernung. Das ist angesichts des äußerst steilen und rauen Geländes ein großer Vorteil. Nur wenige Fundorte liegen in der Nähe von Autopisten, selbst Trampelpfade sind mitunter ein Luxus. Manche Stätten lassen sich nur zu Fuß, zu Pferd oder sogar nur per Hubschrauber erreichen. Aber das entspricht »Andys Gesetz« – ein Ausspruch unseres Kollegen Wyss: »Je beschwerlicher der Weg, desto lohnender Menge und Qualität der Fossilien.« ◁

Fossilien der Tinguiririca-Fauna sind bei ihrer Entdeckung noch von versteinerter Asche und Schlamm eingeschlossen. Die abgebildeten Schädel gehörten zu ausgestorbenen Huftieren, den Notoungulaten. Das linke Exemplar zeigt die für Grasfresser charakteristischen Backenzähne mit hohen Kronen, das rechte stammte von einem wesentlich älteren, Blätter fressenden Tier; das Fossil wurde kürzlich am Rio Teno entdeckt.

John J. Flynn (links), **André R. Wyss** (Mitte) und **Reynaldo Charrier** sind seit zwanzig Jahren als Fossilienjäger in den Anden Chiles unterwegs. Flynn ist Leiter und Kurator der Abteilung für Paläontologie des Naturhistorischen Museums von New York, Wyss lehrt Geowissenschaften an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und Charrier Geologie an der Universität von Chile in Santiago.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Fossile Säugetierzähne der Erdneuzeit (Känozoikum) vom Tertiär bis zum Pleistozän. 70 Millionen Jahre – 70 000 Jahre vor heute. Von Wolfgang Schneider und Heinz Eikamp (Hg.). Naturwissenschaftliche Arbeitsgemeinschaft Obertshausen-Mosbach, 2001

Splendid isolation: The curious history of south american mammals. Von George Gylord Simpson. Yale University Press, 1980

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/896272.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Wärmere Meere – stärkere Hurrikane

Alles deutet darauf hin, dass sich durch die globale Erwärmung die Zerstörungsgewalt tropischer Wirbelstürme erhöht. Sowohl die Windstärken als auch die Niederschlagsmengen werden in bedrohlicher Weise zunehmen.

Von Kevin E. Trenberth

Der Sommer 2004 war ein Alarmsignal: Gleich vier Hurrikane suchten Florida heim, so viele wie noch nie, und zehn Taifune, vier mehr als der bisherige Rekord, tobten über Japan. Aufgeschreckt von dieser Häufung, suchten Meteorologen nach Erklärungen. Steckte die globale Erwärmung dahinter? Die Meinungen waren geteilt.

Doch 2005 schlug Mutter Natur erst richtig zu und bescherte dem Nordatlantik eine Wirbelsturm-Saison, die alles bisher Dagewesene weit in den Schatten stellte. Auf ihrem Höhepunkt verwüsteten die Hurrikane Katrina und Rita weite Landstriche. Nun zweifelte kaum mehr jemand an der Mitschuld der globalen Erwärmung. Die Versicherungsprämien im Südosten der USA schossen in die Höhe, und im Jahr darauf rechneten die Menschen mit dem Schlimmsten. Doch diesmal herrschte Flaute auf dem tropischen Nordatlantik. Wenn die globale Erwärmung eine Rolle spielte, warum blieb es dann 2006 so ruhig?

Eine gründliche Analyse der Wetterlagen liefert eine Erklärung sowohl für den dramatischen Anstieg 2004 und 2005 als auch für die seltsam zahme Saison 2006. Die Schlussfolgerung daraus, die von den meisten Experten geteilt wird, lässt leider wenig Gutes für die fernere Zukunft erwarten.

Ein Hurrikan beginnt als tropische Störung, die sich zu einem organisierten System von Gewittern ausweiten kann. Kommt dieser Gewittercluster ins Rotieren und wehen seine Winde schneller als 63 Kilometer pro Stunde, erhält er einen Namen. Sobald die Höchstgeschwindigkeit 118 Kilometer pro Stunde überschreitet, sprechen Meteorologen von einem tropischen Wirbelsturm.

Solche Stürme heißen im Atlantik und im Nordöstlichen Pazifik »Hurrikane«, im nordwestlichen Pazifik »Taifune« und im Indischen Ozean »Zyklone«. Hier werde ich alle drei Bezeichnungen synonym verwenden.

Vom Gewitter zum Wirbelsturm

Ob Hurrikane durch die globale Erwärmung an Zahl, Größe oder Intensität zunehmen, lässt sich nur ermitteln, wenn man ihre genaue Ursache versteht. Mit den Jahren haben Wissenschaftler immer detailliertere Modelle für die Bildung von Wirbelstürmen entwickelt. Die Zyklone benötigen demnach warmes Wasser und entstehen deshalb meist in den Tropen, wo die Sonnenstrahlen mittags fast senkrecht einfallen. Der Ozean absorbiert die Hauptmenge der auftreffenden Energie und gibt einen Teil durch Verdunstung wieder ab.

Wenn die aufsteigende Feuchte zu Regen kondensiert, wird die Verdampfungsenergie frei und erwärmt die Atmosphäre. Im Winter trägt der Wind diese Wärme bis in hohe Breiten, wo sie ins All abstrahlen kann. Doch im Sommer bleibt die feuchtheiße Luft überwiegend in den Tropen und erklimmt durch Konvektion immer größere Höhen. Dabei bilden sich zunächst Kumulus- und dann Gewitterwolken. Unter geeigneten Bedingungen können mehrere Gewitter zu einem Wirbel verschmelzen, der große Mengen Wärme aus dem Ozean herauspumpt: Ein Hurrikan ist entstanden.

Damit ein Wirbel zu Stande kommt, muss allerdings vorher schon eine atmosphärische Störung existieren. Solche Störungen bilden sich im Nordatlantik typischerweise an der Westküste Zentralafrikas. Ursache sind die Temperaturgegensätze zwischen der Wüste im Landesinneren und den bewaldeten Küstengebirgen. Doch müssen weitere Umstände hinzukommen. Dazu gehören eine Temperatur der Meeresoberfläche von mehr als 26 Grad Celsius, reichlich Wasserdampf und niedriger Luftdruck in der unteren Atmosphäre. Außerdem darf die Windscherung zwischen tiefen und hohen Atmosphärenschichten nur schwach sein; denn Luftströmungen, die stark mit der Höhe variieren, reißen den sich bildenden Wirbel gleich wieder auseinander.

ALFRED T. KAMAJIAN

Noch sind Hurrikane nicht annähernd so groß wie in dieser Collage. Doch ihre Ausdehnung und Stärke wird zweifellos zunehmen, wenn die globale Erwärmung ungebremst fortschreitet.

Ein entscheidender Faktor für die Entstehung von Hurrikanen ist zweifellos die Temperatur der Meeresoberfläche oder kurz SST (nach englisch *sea-surface temperature*). Angesichts der Wetterkapriolen in jüngster Zeit wollten Wissenschaftler deshalb genauer wissen, wie sich diese Temperatur im Lauf der vergangenen Jahrzehnte geändert hat und ob ein Zusammenhang mit Zahl, Größe und Stärke der Hurrikane besteht. Wenn ja, wäre das ein klarer Hinweis auf eine Mitschuld der globalen Erwärmung, als deren Urheber inzwischen der Mensch feststeht.

Durch menschliche Aktivitäten – insbesondere die Verbrennung fossiler Treibstoffe – erhöht sich die Konzentration von Treibhausgasen wie Kohlendioxid in der Atmosphäre. Die resultierende Erwärmung des Globus erfasst auch die Ozeane und lässt deren Oberflächentemperatur zunehmen. Die Frage lautet, welches Ausmaß dieser Anstieg erreicht hat und ob er sich in der Hurrikanaktivität widerspiegelt.

Erst seit 1970 werden Wirbelstürme routinemäßig per Satellit verfolgt. Wie viele es vorher alljährlich gab, ist deshalb nicht genau bekannt. Über Hurrikane im tropischen Nordatlantik gibt es jedoch ab 1944, als dort die Überwachung tropischer Stürme mit Flugzeugen begann, relativ zuverlässige Aufzeichnungen.

Der Blick auf die Daten zeigt bis 1994 keinen klaren Trend. Seitdem ist im Nordatlantik die Zahl der Stürme und Hurrikane, die einen Namen erhalten haben, jedoch deutlich gestiegen. Interessanterweise gilt dasselbe für die Oberflächentemperaturen zwischen dem 10. und 20. Grad nördlicher Breite. Dieser Streifen tropischen Wassers, der sich knapp nördlich des Äquators von Afrika bis Mittelamerika erstreckt, ist die Geburtsstätte der Hurrikane.

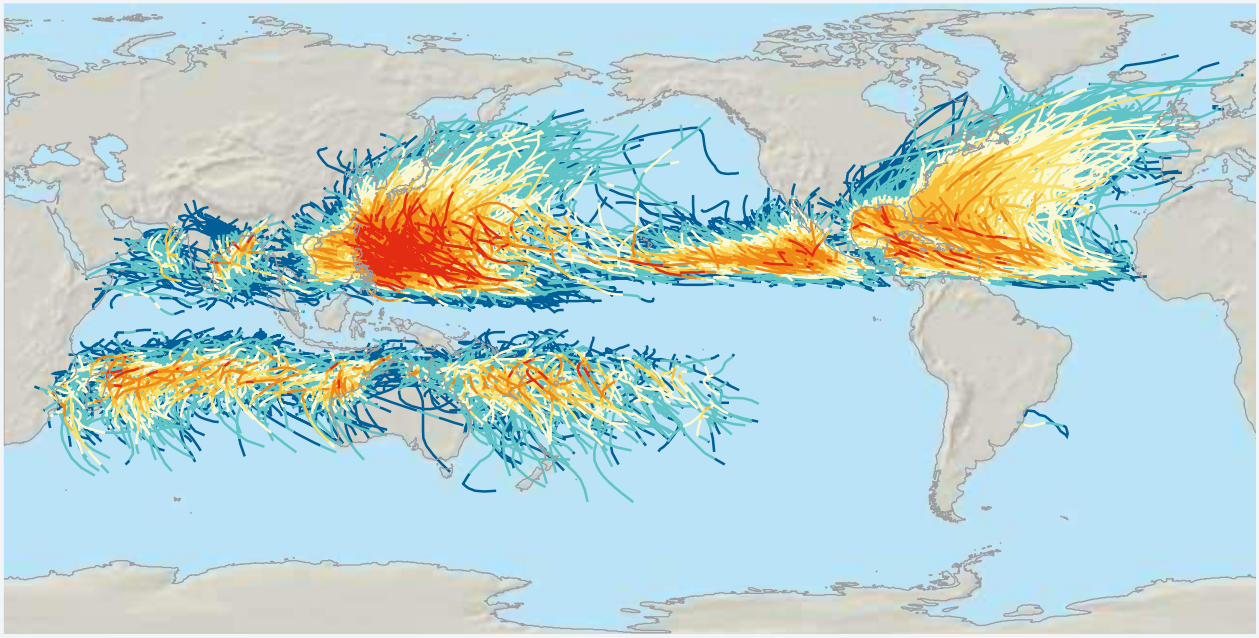
Einige Forscher bezweifeln allerdings, dass der SST-Anstieg im Nordatlantik seit 1994 etwas mit dem Treib- ▷

Wo Zyklone wüten

Die Zugbahnen und Windgeschwindigkeiten aller tropischen Stürme im September 2006 zeigen, in welchen Regionen die Bedrohung am größten ist.

Einteilung nach Windstärke
- tropische Depression (bis 62 km/h)
- tropischer Sturm (63 bis 118 km/h)

Hurrikankategorien (Windstärke in km/h)
- 1 119 bis 153
- 2 154 bis 177
- 3 178 bis 209
- 4 210 bis 250
- 5 mehr als 250



WWW.MAPPINGSPECIALISTS.COM, NACH: ROBERT A. ROHDE; NATIONAL HURRICANE CENTER UND JOINT TYPHOON WARNING CENTER

▷ hauseffekt zu tun hat. Sie halten ihn vielmehr für die Folge der so genannten Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO). Im Zuge dieses natürlichen Zyklus schwanken die Meerestemperaturen im Nordatlantik im Verlauf einiger Jahrzehnte um bis zu 0,5 Grad Celsius.

Als Ursache gelten Veränderungen in der Meereszirkulation: einer Art Umwälzpumpe, bei der warmes Wasser an der Oberfläche mit dem Golfstrom nach Norden wandert, dort abkühlt, absinkt und in der Tiefe zurückfließt. Zwischen den 1970er und 1990er Jahren lagen die SSTs im Nordatlantik relativ niedrig. Seitdem ist die AMO in die wärmere Phase ihres Zyklus gewechselt und hat so zur Vermehrung der Hurrikane beigetragen. Der steile Anstieg seit 1995 oder die Extreme 2005 und 2006 lassen sich damit aber nicht allein erklären. Das ergibt sich aus Computersimulationen.

Wir Klimaforscher sind auf solche numerischen Modelle angewiesen, weil wir Versuche mit der realen Erde schwerlich durchführen können – auch wenn die Menschheit gerade ein unkontrolliertes solches Experiment unternimmt, indem sie erhebliche Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre pustet. Bei den Simulationen gilt es alle wichtigen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse zu berücksichtigen, die das Klima beeinflussen.

Inzwischen können globale Klimamodelle, wie sie meine Kollegen und ich am National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder (Colorado) in langjähriger Arbeit entwickelt haben, die Luft- und Wassertemperaturen, die im Lauf des vergangenen Jahrhunderts an verschiedensten Orten auf der Welt gemessen worden sind, ziemlich gut reproduzieren.

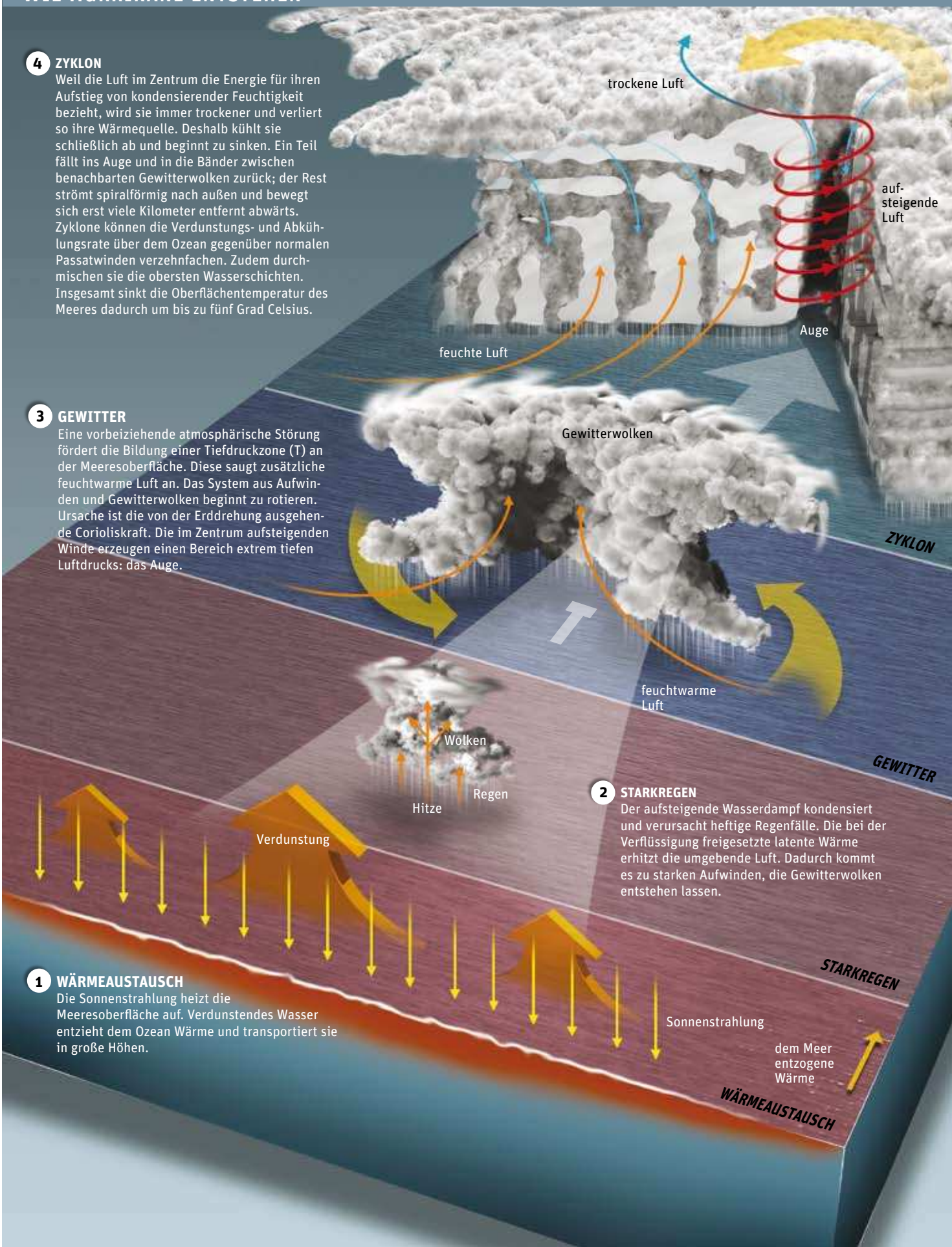
Der Mensch ist schuld

Diese Modelle beziehen neben Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere ihrem Gehalt an Treibhausgasen, viele weitere Faktoren ein – etwa den Energieausstoß der Sonne und bedeutende ▷

In Kürze

- Die globale Erwärmung, verursacht durch den anthropogenen **Ausstoß von Treibhausgasen**, erhöht die Temperatur der Weltmeere und die Verdunstung an der Wasseroberfläche. Beides steigert die Intensität tropischer Wirbelstürme.
- Selbst eine geringfügige **Erwärmung der Ozeane** kann mehr tropische Störungen in Hurrikane verwandeln, die Kraft eines existierenden Sturms vergrößern und für schlimmere Regenfälle sorgen.
- Allerdings hängt die **Zahl der jährlich auftretenden Hurrikane** auch stark von saisonalen Ozeanmustern ab – vor allem von La Niña und El Niño. Letzterer dämpfte die zyklonale Aktivität in der Saison 2006.

Wie Hurrikane entstehen



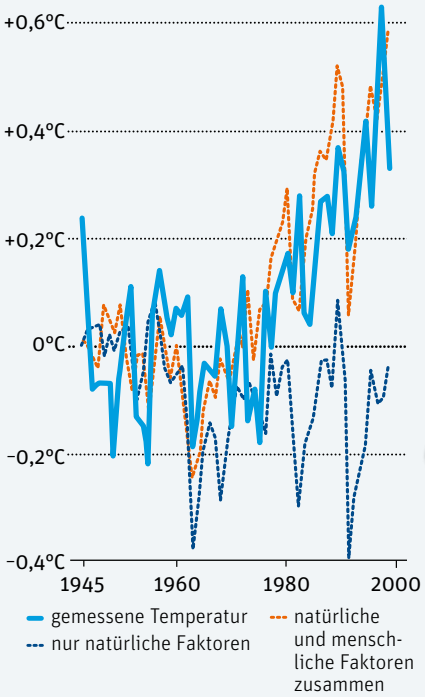
DON FOLEY

Erderwärmung und Wirbelstürme

Parallel zum Anstieg der globalen Mitteltemperatur (1) nimmt auch die Temperatur der Meeresoberfläche zu (2), was zu mehr starken Hurrikanen im Nordatlantik führt (3).

1 Menschengemachter Temperaturanstieg

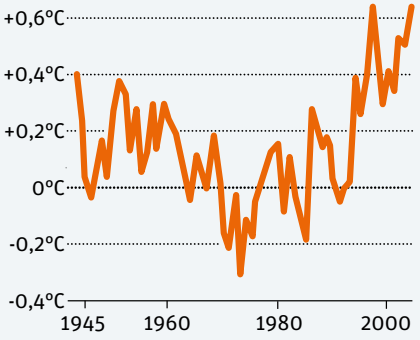
Abweichungen vom Durchschnitt der Jahre 1944 bis 1960



Klimamodelle, die den Effekt der anthropogenen Treibhausgase einbeziehen, passen seit 1970 besser zur Messkurve der globalen Mitteltemperatur als solche, die nur natürliche Faktoren wie die Sonneneinstrahlung und Vulkanausbrüche berücksichtigen.

2 Erwärmung der Meeresoberfläche

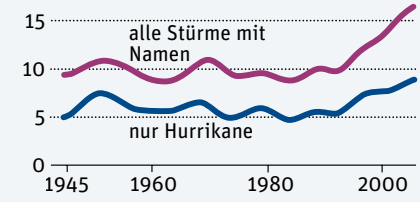
Nordatlantiktemperatur relativ zum Durchschnitt der Jahre 1901 bis 1970



Die Temperatur der Meeresoberfläche im Nordatlantik schwankt leicht von Jahr zu Jahr, aber seit 1994 liegt sie deutlich über dem Langzeitmittel.

3 Mehr starke Stürme

Anzahl pro Jahr im Nordatlantik



Seit Mitte der 1990er Jahre hat die Zahl der benannten tropischen Stürme und der Hurrikane im Nordatlantik tendenziell zugenommen. Die Statistik reicht zurück bis 1944, als die Beobachtung der Zyklone mit Flugzeugen begann.

JEN CHRISTIANSEN, NACH: KEVIN E. TRENBERTH UND GERALD MEEHL, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (NCAR)

▷ Vulkanausbrüche, deren Eruptionsprodukte die Sonnenstrahlen so stark blockieren können, dass die Erde für ein oder zwei Jahre abkühlt.

Bei unseren Simulationen lassen sich die Auswirkungen verschiedener natürlicher und menschlicher Einflüsse – darunter die Folgen anthropogener Emissionen – getrennt ermitteln. Dabei zeigt sich, dass die jüngste Erwärmung des Atlantiks den Effekt der AMO deutlich übersteigt und auf der Aufheizung der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten beruht. Nach jüngsten Untersuchungen durch Benjamin Santer vom Lawrence Livermore National Laboratory und seine Kollegen gehen sogar sowohl die Erwärmung im tropischen Atlantik als auch die im Pazifik auf die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen zurück.

Weithin anerkannten Schätzungen zufolge sind die SSTs seit 1970 im globalen Durchschnitt um ungefähr 0,6 Grad Celsius gestiegen. Das mag nach wenig klingen, aber es bedarf keiner großen Änderungen, um die Gewalt eines Sturms erheblich zu beeinflussen: Als Katrina über den Golf von Mexiko zog, reichten Schwankungen der SST um ein Grad aus, den Hurrikan in die nächsthöhere oder -tiefere Kategorie zu befördern.

Das Zünglein an der Waage

Der Blick auf diese Befunde macht klar, dass die globale Erwärmung in der Tat zu intensiveren Wirbelstürmen geführt hat. Im Juni 2005 gab ich in der Fachzeitschrift »Science« eine detaillierte Begründung für diesen Zusammenhang. Unabhängig davon lieferte Kerry Emanuel vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge nur zwei Monate später in »Nature« den direkten statistischen Nachweis anhand von Messdaten.

Demnach war die deutliche Zunahme in Stärke und Dauer von Wirbelstürmen rund um den Globus seit 1970 eng mit dem Anstieg der SSTs verknüpft. Einwände anderer Experten führten zwar zu moderaten Korrekturen der einzelnen Korrelationen, änderten aber nichts am Gesamtbild.

Im September 2005 legte ein Team um Peter Webster vom Georgia Institute of Technology in »Science« explizit dar, dass die Anzahl von Hurrikanen der beiden höchsten Kategorien seit 1970 deutlich gestiegen ist; insbesondere hat ihr Anteil an der Gesamtheit der Hurrikane zugenommen. Wie die Analyse ergab,

entspricht dieser Anstieg genau dem, was angesichts der erhöhten SSTs zu erwarten ist.

Die Rekord-Hurrikanjahre 2004 und 2005 passten natürlich sehr gut zu diesem Trend. Doch warum gab es dann 2006 so wenig Wirbelstürme? Während des Sommers 2005 erreichte auch die Oberflächentemperatur im Atlantik zwischen 10 und 20 Grad nördlicher Breite einen Rekord. Sie lag 0,92 Grad Celsius über dem Mittel der Jahre 1901 bis 1970. Das ist in der Tat ein extrem hoher Wert. Er lässt sich nicht einmal erklären, wenn man die Effekte von AMO und globaler Erwärmung addiert.

Was war der Grund? Den entscheidenden Beitrag hatte ein Klimaphänomen geleistet, das während des vorangegangenen Winters und Frühlings aufgetreten war: El Niño. Dabei erwärmt sich, ausgelöst durch eine Kopplung zwischen ozeanischen und atmosphärischen Strömungen, der tropische Ostpazifik.

Im nordhemisphärischen Winter 2004 /2005 entwickelte sich ein schwacher bis mäßig starker El Niño. Während er im Ostpazifik für heftige Niederschläge sorgte, führte er im tropischen Atlantik zu blauem Himmel und Windstille. Und das hieß: weniger Abkühlung durch Verdunstung. Dadurch erwärmte sich der Ozean um zusätzliche 0,2 Grad Celsius. Doch im Frühsommer flaute der El Niño ab. Das drosselte die Windscherung im Atlantik und schuf damit eine weitere günstige Bedingung für die Bildung von Hurrikanen. Im Endeffekt war es somit El Niño, der 2005 – zusammen mit der AMO und der globalen Erwärmung – eine Rekordzahl an teils sehr starken Hurrikanen hervorbrachte.

Im Winter 2005/2006 dagegen übernahm La Niña – das Gegenstück zu El Niño – das Regiment. Sie sorgte für eine Abkühlung im Ostpazifik. Dadurch verstärkten sich im Nordatlantik die Passatwinde. Sie entzogen dem Ozean Wärme, sodass die SSTs in der Hurrikansaison 2006 knapp unterhalb oder in der Nähe der Durchschnittswerte lagen.

Zudem entwickelte sich während des Sommers 2006 ein El Niño, durch den die Windscherung im tropischen Atlantik zunahm. Insgesamt herrschten dort also ganz andere Bedingungen als 2005. Auch vor dem Hintergrund generell gestiegener SSTs ist eben nicht auszuschließen, dass Schwankungen von Jahr zu Jahr den generellen Trend kurzfristig verschleiern.

Alle Aussagen von Klimaforschern sind natürlich nur so glaubwürdig wie die Beobachtungen und Modelle, auf ▷

Die schlimmsten Zyklone

Der teuerste:
Katrina, Golfküste, 2005; mehr als 100 Milliarden US-Dollar Schaden

Der tödlichste:
Bhola, Gangesdelta, 1970; mehr als 300 000 Todesopfer

Der stärkste beim Erreichen der Küste:
Camille, Golfküste, 1969; höchste Dauerwindgeschwindigkeit von 306 km/h

Der längste:
John, Pazifik, 1994; hielt sich 31 Tage lang

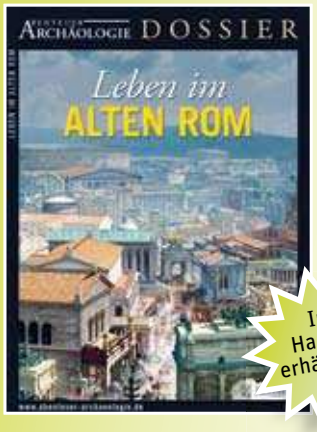
Der größte:
Tip, Pazifik, 1979; 2200 Kilometer im Durchmesser

Der Hurrikan Katrina richtete 2005 schwere Verwüstungen im Süden der USA an. So sah es danach in der Stadt Gretna nahe New Orleans aus.

CORBIS / REUTERS, RICK WILKING

Neuerscheinungen

Innerhalb weniger Generationen gelang es Wissenschaftlern eine Chronologie des Universums zu skizzieren, die 14 Milliarden Jahre umfasst und auch das weitere Schicksal von Sternen und Galaxien offenbart. Zu den Überraschungen des vergangenen Jahrzehnts gehört die Entdeckung der Dunklen Energie, die womöglich auf eine neue, bislang unbekannte Physik hindeutet. Das DOSSIER »Kosmische Ursprünge« zeigt den aktuellen Stand der Denkmodelle vom Werden unseres Kosmos; € 8,90



Von großen Schlachten, weisen römischen Kaisern und verrückten Imperatoren hat man schon viel gehört. Wie aber lebten die einfachen Menschen im Römischen Reich? Welche Sehn-süchte hatten sie und wie fanden sie sich mit ihren Lebensumständen zurecht? Wie war die medizinische Versorgung, und was machte ein einfacher Arbeiter nach Feierabend? Das **Abenteuer Archäologie**-DOSSIER bietet die spannendsten Beiträge des Magazins zu diesem Thema und kostet € 8,90.

Bestellen können Sie mit dem Beihefter oder unter

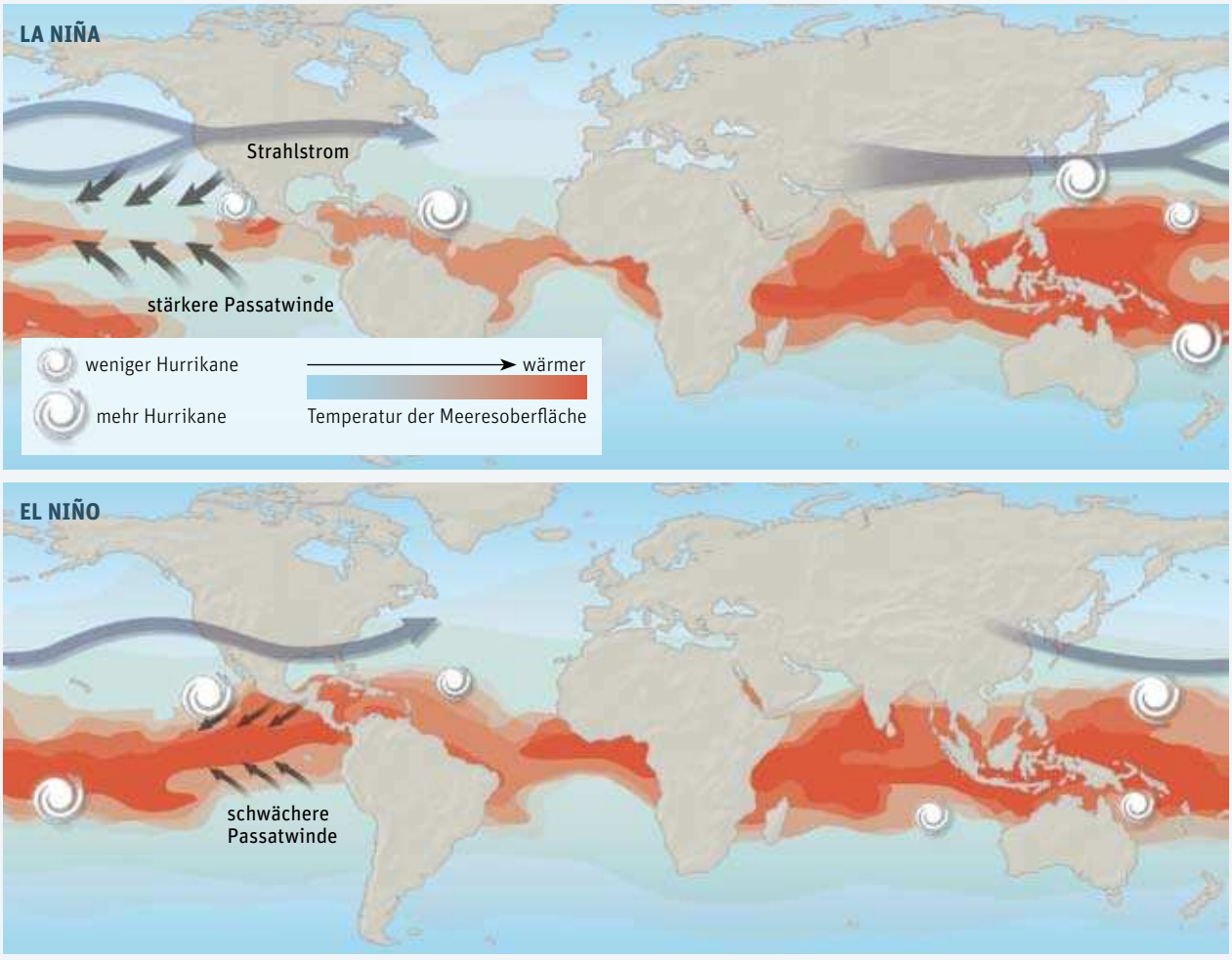
www.spektrum.com/sonderhefte

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Warum es 2006 ruhig blieb

Trotz wärmerer Ozeane können vorübergehende Klimaphänomene die Zahl der Hurrikane in einem Jahr beeinflussen. Eines davon ist La Niña. Kühlt sie während des Winters und Frühlings den Ostpazifik, verstärken sich dort die Passatwinde und entziehen dem Meer die für Stürme benötigte Wärme. Zugleich aber wird der Strahlstrom über dem Pazifik geteilt und nimmt dann über dem Atlantik eine nördlichere Route. Dadurch können Wirbelstürme, die vor Westafrika entspringen, leichter bis zur Karibik wandern. Das ist einer der Gründe für die Rekord-Hurrikansaison 2005. Erwärmt jedoch El Niño, der Gegenspieler von La Niña, den tropischen Ostpazifik im Winter und Frühjahr, macht der Strahlstrom über Nordamerika einen Schlenker nach Süden. Über dem Atlantik verstärkt er dann die Windscherung – den Unterschied zwischen Luftströmungen in verschiedenen Höhen. Dadurch werden entstehende Sturmsysteme auseinandergerissen. Das sorgte 2006 für eine unerwartet geringe Zahl an Hurrikanen.



WWW.MAPPINGSPECIALISTS.COM

▷ denen sie beruhen. Für die Simulation und Prognose von Hurrikanen verwenden wir am NCAR das so genannte Weather Research and Forecasting Model. Es presst die Klimadaten der realen Welt in ein Gitter mit einer Maschenweite von vier Kilometern. Gemessen am heutigen Standard ist das ein sehr dichtes Netz.

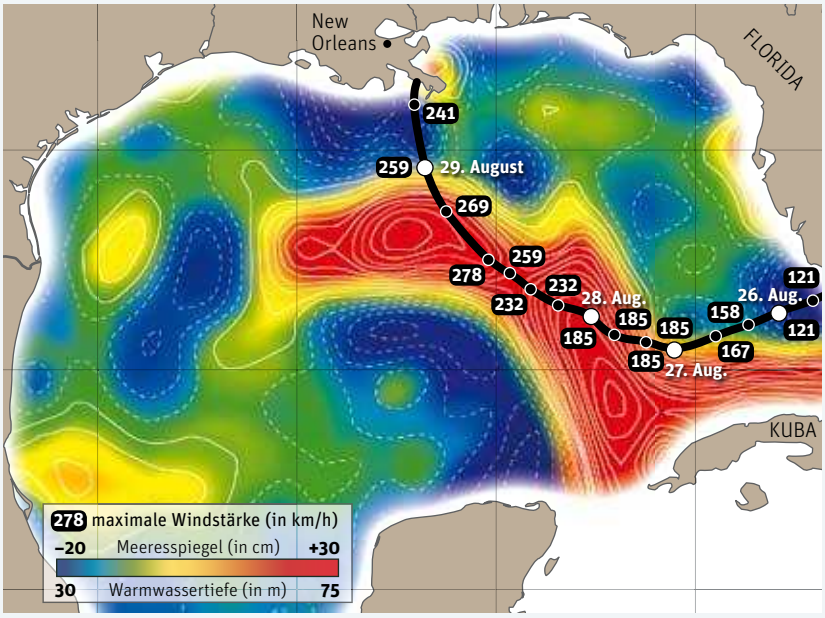
Bei den globalen Simulationen des staatlichen Wetterdiensts der USA liegen die Gitterpunkte 35 Kilometer auseinander, und auch in den regionalen Modellen betragen die Maschenweiten noch acht bis zwölf Kilometer. Eine Auflösung von vier Kilometern lässt sich nur mit enormem Rechenaufwand und langen Simulationszeiten erreichen; Wetterprognosen würden da nicht rechtzeitig fertig. Wir haben zum Glück mehr Zeit. Das erlaubt uns in Verbindung mit der geringen Maschenweite zugleich, alle Konvektionseffekte direkt zu berechnen – was wiederum der Genauigkeit zugutekommt.

Wir vertrauen unseren Modellen auch deshalb, weil sie die Eigenschaften tatsächlicher Hurrikane ziemlich gut reproduzieren, wenn man sie mit realen Daten füttert. Das gilt vor allem für die Zugbahnen der Wirbelstürme 2004 und 2005. Als wir die SST-Werte aus den Tagen eingaben, an denen Katrina über den Golf von Mexiko wanderte, nahm der Modellhurrikan fast den gleichen Weg wie der echte Sturm.

Ermutigt durch diese Resultate, versuchten wir außerdem herauszufinden, ob und inwieweit die erhöhten SSTs auch für mehr Niederschläge durch einen Hurrikan sorgen. Im Fall des simulierten Wirbelsturms stieg bei Zunahme der SST um ein Grad Celsius der Wasserdampfgehalt in der Umgebung um

Warmes Wasser beflügelt Stürme

Nachdem der Hurrikan Katrina Florida überquert hatte, gehörte er nur noch knapp zur Kategorie 1. Dann aber zog er über eine tief reichende Schicht warmen Wassers (rot), die als Schleifenströmung bekannt ist und sich durch einen erhöhten Meeresspiegel verrät. Da Hurrikane den Ozean bis zu hundert Meter tief aufrühren, konnte Katrina dieser Schicht die komplette Wärme entziehen. Das katapultierte den Wirbelsturm binnen weniger Tage in die Kategorie 5.



WWW.MAPPINGSPECIALISTS.COM. NACH: UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER

sieben Prozent an. Zugleich erreichten die Winde höhere Spitzengeschwindigkeiten. Dadurch saugten sie mehr Feuchte in den Sturm und förderten zudem die Verdunstung. Insgesamt trieb ein SST-Anstieg um ein Grad Celsius im Umkreis von 400 Kilometern um das Auge des Modellhurrikans die Regenmengen um 19 Prozent in die Höhe.

Die Bedrohung wächst

Insofern gibt es allen Grund zu der Annahme, dass die globale Erwärmung die Niederschlagsmengen von Zyklonen vermehrt. Der von ihr bewirkte SST-Anstieg um 0,6 Grad Celsius seit 1970 sollte den durchschnittlichen Wasserdampfgehalt der Atmosphäre um vier Prozent angehoben haben. Das deckt sich mit Messungen von Mikrowellen-Instrumenten auf Satelliten, wonach die Luftfeuchte seit 1988 um zwei Prozent gestiegen ist.

Wie eingangs gesagt, kondensiert in einem Zyklon der zusätzliche Wasserdampf und gibt latente Wärme ab, die den Aufwind und damit den Einstrom von Luftmassen in den Wirbel verstärkt. Eine Zunahme des Wasserdampfgehalts um vier Prozent kann so die Niederschlagsrate um acht Prozent anheben. Demnach waren von den 300 Litern Regen pro Quadratmeter, die Katrina über New Orleans ausgoss, ungefähr 25 Liter der globalen Erwärmung zuzuschreiben.

Beobachtungen und Theorie legen also gleichermaßen nahe, dass Zyklone durch die Erderwärmung an Intensität gewinnen werden. Aber steigt auch ihre Zahl? Das ist schwer vorherzusagen, weil tropische Wirbelstürme die Wärme viel wirksamer aus dem Ozean abführen als durchschnittliche Gewitter. Ein großer Hurrikan kann auch effizienter sein als zwei kleine. Deshalb ist es möglich oder sogar wahrscheinlich, dass sich künftig weniger, dafür aber stärkere Zyklone bilden. Ein heftiger Wirbelsturm hinterlässt nach seinem Durchzug einen kühleren Ozean, was die Entstehungsbedingungen für potenzielle Nachfolger zumindest kurzfristig verschlechtert.

Was Zyklone in der ferneren Vergangenheit angeht, sind sich die Experten uneins. Manche halten die historischen Beobachtungsdaten für zu inkonsistent, um sichere Schlussfolgerungen daraus ziehen zu können. Andere erachten zwar die Messwerte vom Nordatlantik für solide (zumindest seit 1944), sind sich aber weniger sicher, was den Pazifik betrifft.

Um mehr Klarheit zu gewinnen, sollten alle Satellitendaten, die in den Archiven lagern, mit modernen Methoden erneut aufgearbeitet werden. Daraus ließen sich dann konsistentere Informationen über die Kenngrößen der früheren Stürme wie Intensität, Ausdehnung und Dauer herausdestillieren.

Festzuhalten bleibt, dass die sich stetig verbessernden wissenschaftlichen Aufzeichnungen klar auf eine kontinuierliche Erwärmung der Meeresoberfläche im Gefolge des allgemeinen Klimawandels hinweisen. Dadurch wiederum steigt die Intensität der Hurrikane. Im Report des UN-Klimarats von diesem Jahr steht: »Beobachtungsdaten belegen einen Anstieg der intensiven tropischen Zyklonaktivität im Nordatlantik seit ungefähr 1970, der mit einer Zunahme der Oberflächentemperaturen tropischer Meere korreliert ist.« Während wir weiter unsere Computermodelle perfektionieren, tun die Bewohner der betroffenen Küstenregionen also gut daran, sich auf extremere Bedrohungen einzustellen und Schutzmaßnahmen zu ergreifen. ◁

Kevin E. Trenberth leitet die Sektion Klimaanalyse am National Center for Atmospheric Research in Boulder (Colorado). Seine Forschungsschwerpunkte sind Energie- und Wasserzyklen innerhalb des Klimasystems. Er hat als koordinierender Leitautor zum Sachstandsbericht des UN-Klimarats (IPCC) aus diesem Jahr beigetragen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Divine wind: the history and science of hurricanes. Von K. Emanuel. Oxford University Press, 2005

Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment. Von P. J. Webster et al. in: Science, Bd. 309, S. 1844, 16. 9. 2005

Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Von K. Emanuel in: Nature, Bd. 436, S. 686, 4. 8. 2005

Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. Von K. E. Trenberth und D. J. Shea in: Geophysical Research Letters, L 12704

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/896266.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **SpektrumTALK** unter www.spektrum.de/talk.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Kommt die gesteuerte Persönlichkeit?

Ob Parkinson, Depression oder Zwangsneurose – Stimulationselektroden im Gehirn können zum letzten Ausweg werden. Schon verkünden Visionäre den Beginn eines neuen Zeitalters: die technische Aufrüstung des Gehirns schlechthin.

Von Tanja Krämer

Wenn eine Frau ihrem Arzt erzählt, sie habe Lust, mal wieder Kegeln zu gehen, erscheint dies belanglos. Die Bemerkung kam jedoch von einer älteren Dame, die seit ihrem 21. Lebensjahr unter schweren Depressionen litt und seit Monaten wieder besonders schlimm betroffen war. Herkömmliche Therapien versagten. Den Spaß am Kegeln und anderen Aktivitäten hatte die 66-Jährige schon lange verloren – als liege ein Mantel aus Blei über jedem Verhalten und Erleben. Nun machte sie obige überraschende Aussage: nach dem Einschalten zweier Elektroden in ihrem Gehirn.

Die Patientin gehört zu den ersten Teilnehmern einer Pilotstudie der Universitätskliniken Köln und Bonn, die ausloten soll, ob eine so genannte Tiefenhirnstimulation einer bestimmten Hirnregion schwerste, anderweitig nicht mehr linderbare Depressionen mildern kann. Feine Elektroden werden hierbei in einer Operation tief ins Gehirn bis zur Zielregion eingeführt, wo sie exakt justierbare elektrische Impulse an die Nervenzellen weiterleiten. Die Signale liefert ein Impulsgenerator, der im Bereich des Schlüsselbeins unter der Haut implantiert ist, ähnlich wie ein Herzschrittmacher (siehe Grafik im Kasten S. 45).

Zahlreiche Forscher und vor allem die behandelnden Ärzte sind von der Aussicht begeistert, mit der experimentellen Methode zumindest einigen der Patienten noch helfen zu können, bei denen zuvor alle Kunst versagte. Das Wichtigste aber: Der Eingriff ist zwar invasiv und nicht ohne Risiko, die Tiefenhirnstimulation jedoch reversibel. Wenn einem Patienten die Veränderungen nicht gefallen oder Nebenwirkungen auftreten und Modifikationen der Impulsparameter und der anwählbaren Kontaktpunkte am Elektrodenende keine Abhilfe bringen, kann das Gerät abgeschaltet werden. Auf Wunsch wird das Implantat auch entfernt.

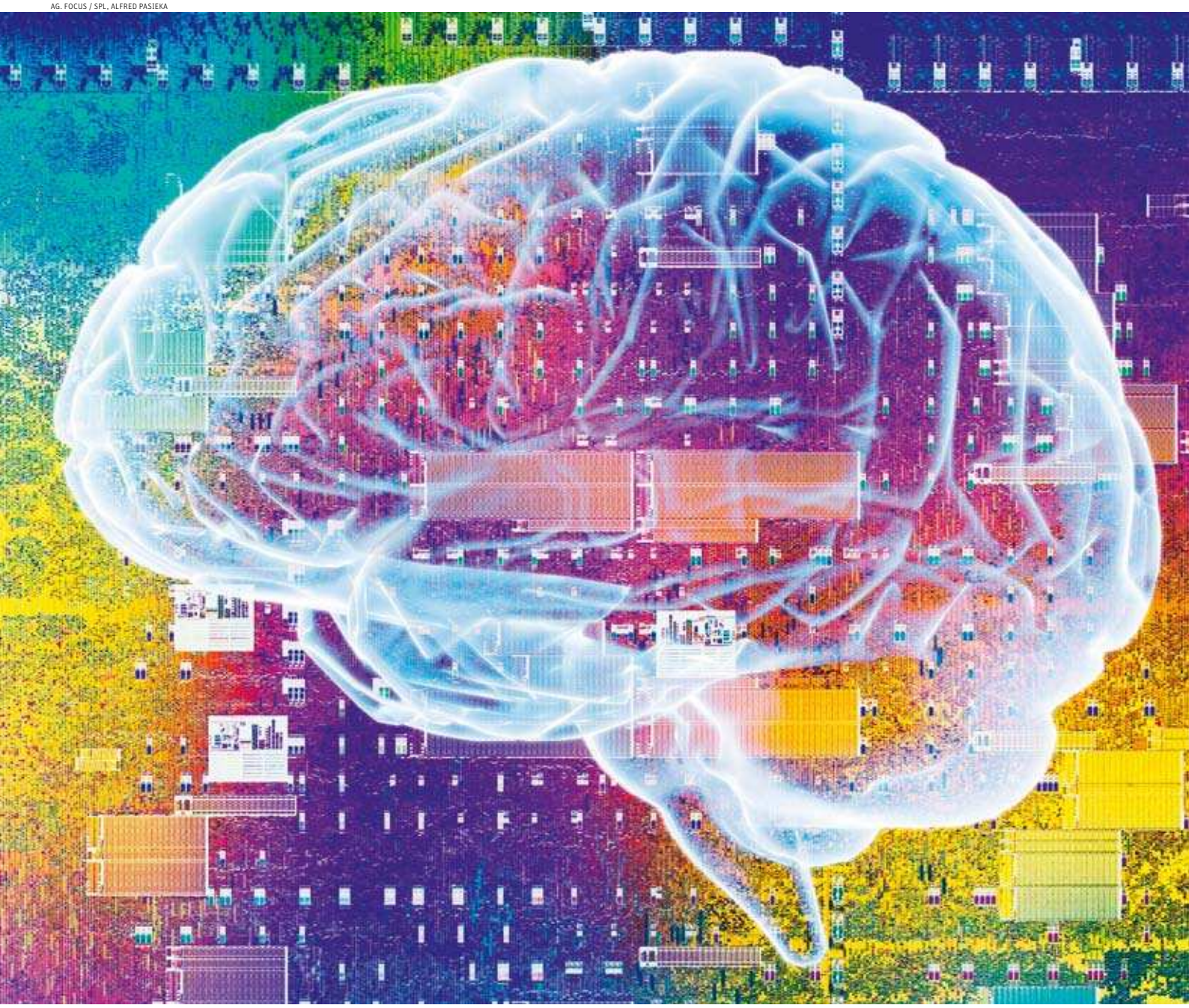
Ethiker sehen allerdings Entwicklungen wie diese – vor allem auch mit Blick auf die Vision eines Chips im Gehirn – mit gemischten Gefühlen: Eine kleine »Maschine« im Kopf, welche die Stimmung bessert und unsere Sicht auf die Welt verändert? Eine solche Vorstellung bereitet so manchem tiefstes Unbehagen. Schließlich bestimmt das Gehirn wie kein anderer Körperteil unsere Identität und Persönlichkeit. Hier werden unsere wichtigsten Erlebnisse gespeichert, hier ▷

In Kürze

- **Schwere Depressionen oder Zwangsstörungen** stellen eine hohe Belastung für die Patienten dar. Ein nicht unerheblicher Teil erweist sich als therapieresistent.
- Durch so genannte **Tiefenhirnstimulation über Elektroden**, wie sie bereits gegen Bewegungsstörungen angewandt wird, versuchen Mediziner solchen Menschen zu helfen. Die Wirkweise ist noch nicht genau geklärt.
- Ethiker sehen allerdings Entwicklungen wie diese – vor allem mit Blick auf die Vision möglicher **Neurochips im Gehirn** – mit gemischten Gefühlen, zumal Zukunftsforscher mehr als nur therapeutische Anwendungen erwarten. Die Technisierung des Körpers würde unser gesamtes Welt- und Menschenbild gründlich verändern.

Chips im Gehirn, die auf Knopfdruck intelligenter, aufmerksamer oder glücklicher machen, sind noch reine Utopie. Medizinisch wird derzeit nur versucht, Menschen mit schweren psychiatrischen Erkrankungen durch einfache Stimulationselektroden zu helfen.

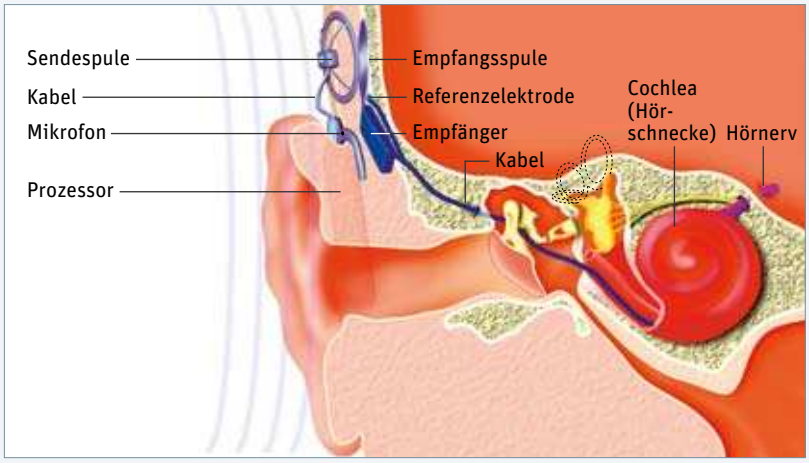
AG. FOCUS / SPL, ALFRED PASIEKA



Neuroprothesen für geschädigte Sinne

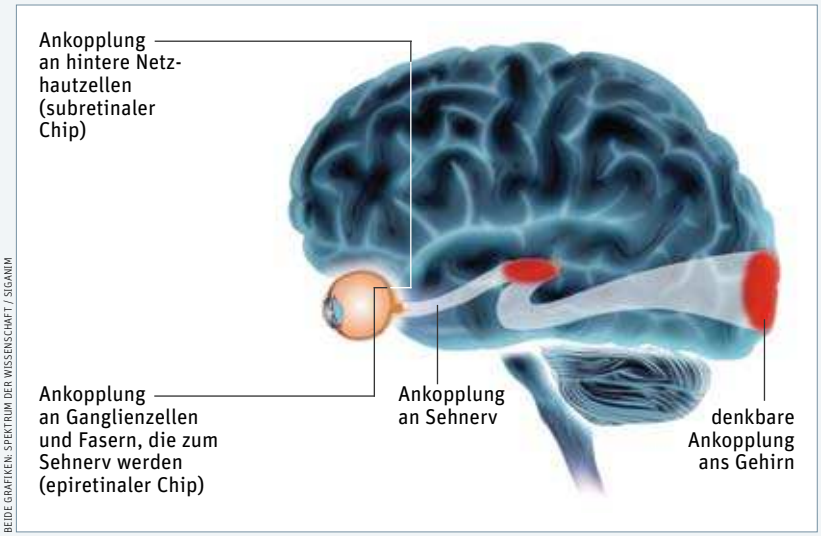
Ende der 1970er Jahre verwandten Forscher erstmals Elektroden, um damit den Nervenfasern in der Hörschnecke von Tauben akustische Reize in elektrischer Form zu übermitteln. Heute tragen weltweit über 100 000 Menschen ein solches Cochlea-Implantat. Hier sitzen die Elektroden freilich nicht im Gehirn, sondern an den Sinnesnerven der Hörschnecke (Cochlea), welche die Signale an das Hörzentrum im Gehirn weiterleiten (obere Grafik). Bei Patienten, deren Hörnerven beispielsweise durch Tumoren völlig zerstört wurden, greift man indes direkt in eine Relaisstation im Gehirn ein: Hier vermitteln Hirnstammimplantate zumindest ansatzweise Geräusche und Töne.

Selbst ins Auge wurden inzwischen erste »Sehchips« eingepflanzt: Im März dieses Jahres stellte Eberhart Zrenner von der Universitäts-Augenklinik Tübingen eine vierwöchige Pilotstudie vor. Die sieben erblindeten Patienten konnten demnach mit Hilfe des so genannten subretinalen Implantats grob Muster erkennen, Gegenstände lokalisieren und Lichtquellen beschreiben. Der Chip soll abgestorbene Sehzellen in der Netzhaut ersetzen (untere Grafik).



Beim Cochlea-Implantat reizt ein Bündel von feinen Elektroden den Hörnerv in der Hörschnecke im Innenohr, deren Sinneszellen defekt sind. Einen vollständigen Ersatz für das komplexe biologische System bietet ein Cochlea-Implantat allerdings noch nicht.

Sehchips sollen wenigstens grob die Funktion untergegangener Sehzellen der Netzhaut übernehmen. Denkbar sind auch Neuroprothesen am Sehnerv oder am Sehzentrum, je nachdem, welche Teile der Sehbahn (hellgrau) bis zum Hinterkopf unterbrochen sind.



BEIDE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

▷ entstehen Freude und Hass. Niemand weiß genau, wie sich die Manipulation der Neuronen auf den Geist auswirkt. Ist man noch dieselbe Person, wenn die Stimulation eingeschaltet wird, oder bestimmt womöglich das Implantat, was gedacht, begehrt oder verachtet wird?

Andere sehen in künftigen Neurochips hingegen ein Entwicklungspotenzial. Der Technikexperte Ramez Naam etwa – ein Mitglied des betont technikaffinen Institute for Ethics and Emerging Technologies, das sich als Denkfabrik ohne institutionelle Heimat sieht – veröffentlichte 2005 sein viel beachtetes Buch »More than Human: Embracing the Promise of Biological Enhancement«. Darin schildert er enthusiastisch, wie einmal auch Gesunden zu einem besseren Leben verholfen werden könnte: mit Chips zur Verbesserung der Merkfähigkeit, für die dauerhafte Glückseligkeit oder gar zur Steigerung der Intelligenz.

Die Diskussion um ein solches »Enhancement« ist in vollem Gang. Kenneth M. Ford, Direktor des Florida Institute for Human and Machine Cognition in Pensacola, schrieb schon 2003: »Durch die Symbiose von Mensch und Maschine haben wir eine evolutionäre Schwelle erreicht, an der unsere Spezies nicht nur in der Lage ist, willentlich die eigene Evolution zu bestimmen, sondern die Regeln zu verändern, nach denen Evolution geschieht.« Die »Borg-Hypothese« nennt er ironischerweise seine Vision – nach dem Vorbild der Borg, einer Verschmelzung von Mensch und Maschine, die in der Sciencefiction-Serie »Raumschiff Enterprise: Das nächste Jahrhundert« die Menschheit das Fürchten lehrt.

Praktikern wie Thomas Schläpfer, Leiter der Brain Stimulation Group der Universität Bonn, der die deutsche Pilotstudie zur Erforschung der Tiefenhirnstimulation bei Depressionen koordiniert, sind solche Visionen suspekt: »Die Tiefenhirnstimulation ist eine Anwendung für Kranke, kein Verfahren für jedermann. Sie wird nur bei solchen Patienten getestet, für die praktisch keine Hoffnung mehr besteht und die unter schwersten Symptomen leiden.« Diese Menschen sind häufig suizidgefährdet. Neuroimplantate im Gehirn von Gesunden – so Schläpfer – seien völlig ausgeschlossen. Selbst bei Kranken gebe es strengste Richtlinien. In Frage kommt ein Patient zum Beispiel nur, wenn

▶ andere Behandlungsmethoden fehlgeschlagen sind,
▶ nach eingehender Aufklärung der Teilnahme an der Studie zugestimmt wurde,
▶ ein unabhängiger Psychiater ein positives Votum abgibt
▶ und zudem eine Ethikkommission ihr Okay gibt.

»Wir machen uns hier sehr genau Gedanken«, sagt der Mediziner: »Wir würden nie einfach so im Gehirn eines Menschen herumstochern.«

Für Schläpfer und seine Kollegen sind Neuroimplantate gleich welcher Art kein Lifestyle-Instrument, sondern eine klar induzierte medizinische Behandlungsmethode – der allerdings in den vergangenen Jahren ein rasanter Aufstieg beschieden war (siehe Kästen auf dieser Doppelseite).

Zielort von Erbsengröße

Die Tiefenhirnstimulation selbst ist in manchen Bereichen schon länger etabliert und hat sich für zahlreiche Menschen zu einer viel versprechenden Behandlungsmethode entwickelt, zum Beispiel bei verschiedenen Formen von Bewegungsstörungen. Am bekanntesten ist hier die Anwendung bei Parkinson, nach einer zehnjährigen Vorbereitungsphase seit 1998 für diesen Zweck in Europa allgemein verfügbar, seit 2002 auch in den USA zugelassen. Seither bekamen weltweit über 35 000 bewegungsgestörte Patienten Elektroden in ihr Gehirn gepflanzt: bei Parkinson, dem Hauptanwendungsgebiet, in erster Linie in den knapp erbsengroßen subthalamischen Kern, der bei der Bewegungsabstimmung mitwirkt.

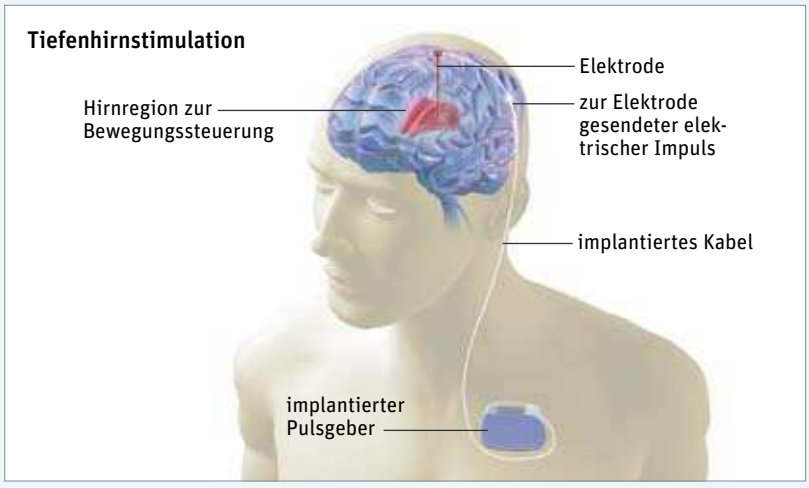
Was nun Depressionen anbelangt, so startete die aktuelle deutsche Pilotstudie der Universitätskliniken Köln und Bonn als zweite größere Untersuchung weltweit. Abgesehen von zwei Einzelfällen wurde die Tiefenhirnstimulation zuvor nur von Helen Mayberg von der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) an sechs Depressiven getestet, wovon vier ansprachen. (Mitte letzten Jahres konnte sie von sechs weiteren berichten, wovon wiederum vier profitierten.) Studienleiter Schläpfer und sein Kollege Volker Sturm, Neurochirurg und Experte im Bereich der Tiefenhirnstimulation an der Universität Köln, behandelten zunächst drei Patienten, zehn sollen es insgesamt werden. Zielort ihrer Elektroden ist der linke und der rechte *Nucleus accumbens*, eine an- ▷

Stimulationselektroden fürs Gehirn

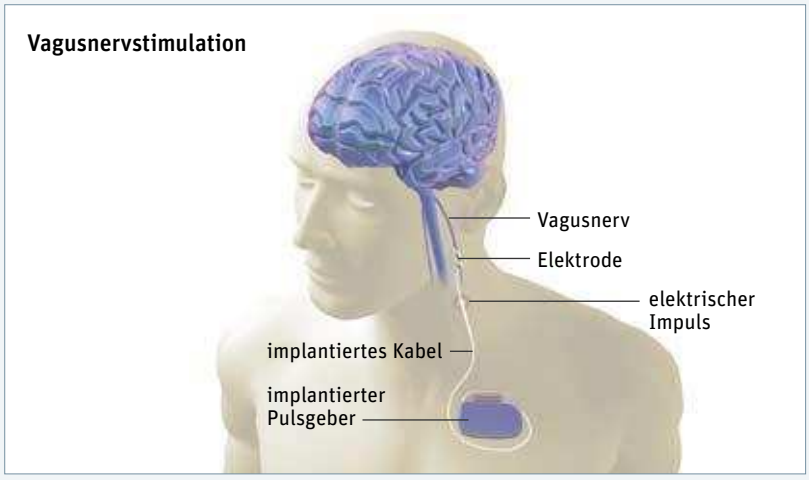
Bei Bewegungsstörungen wie der Parkinsonkrankheit wird eine so genannte Tiefenhirnstimulation schon länger eingesetzt, wenn Medikamente nicht mehr ausreichen (obere Grafik). Ein solcher »Hirnschrittmacher« kann beispielsweise permanentes Zittern unterdrücken. Bei therapieresistenter Epilepsie hilft manchen Patienten eine Stimulation des linken Vagusnervs außerhalb des Gehirns, Anfälle zu unterdrücken (untere Grafik).

Interessanterweise stellten sich bei beiden Verfahren auch psychische Wirkungen ein. Inzwischen wird die Tiefenhirnstimulation vor allem bei schwersten Depressionen, Zwangsstörungen und anderen psychiatrischen Erkrankungen als letzter Ausweg geprüft. Allerdings bestehen Risiken wie Infektionen, Schlaganfälle oder unerwünschte Nebenwirkungen und Veränderungen. Anders als ein operatives Ausschalten fehlfunktionierender Hirnregionen ist die Stimulation reversibel. Muster und andere Parameter der übermittelten Impulse werden individuell angepasst. Bei keinem der Stimulationsverfahren ist aber im Detail bekannt, was es alles im Gehirn bewirkt.

Mit Blick auf zu erwartende Entwicklungen – Stichwort: Hirnchip – erwachsen Bedenken, dass sich Gesunde einmal so etwas wie »Glück auf Knopfdruck« installieren oder in anderer Weise ihr Gehirn technisch aufrüsten lassen möchten. Wie wird sich dadurch der Mensch und mit ihm seine Kultur und Gesellschaft ändern?



Eine elektrische Tiefenstimulation des Gehirns kann Bewegungsstörungen wie permanentes Zittern bei Parkinson mildern.



Durch direkte elektrische Stimulation des Vagusnervs in Halshöhe lässt sich ein aufkommender epileptischer Anfall unterdrücken.

SPEKTRUM-INTERVIEW

»Ich sehe kein ethisches K.-o.-Argument, um diese Entwicklungen zu verhindern.«

FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Armin Grunwald

Armin Grunwald ist Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse in Karlsruhe und beschäftigt sich als Physiker und Philosoph intensiv mit der Ethik moderner Technikanwendung.

Spektrum: Neuroimplantate zur Behandlung von Epilepsie und Parkinson werden mittlerweile bei Patienten mit Depressionen und Zwangsstörungen getestet. Sehen Sie einen qualitativen Unterschied zwischen der Anwendung bei einer Bewegungsstörung wie Parkinson und einem Gemütsleiden wie der Depression?

Grunwald: Intuitiv ja, denn bei Parkinson handelt es sich klar um eine Nervenkrankheit, die physiologische Ursachen hat. Bei Depressionen denkt man eher an die Psyche, und wenn man sieht, wie manchmal ein Implantat oder eine Hirnoperation psychisch Kranken überspitzt gesagt zu guter Laune verhelfen kann, dann ist das erst einmal irritierend. Es gibt aber auch Anteile an Depressionserkrankungen, die durchaus physiologisch bedingt sind. Sofern das der Fall ist, besteht kein qualitativer Unterschied. Es geht bei der aktuellen Depressionsbehandlung durch Tiefenhirnstimulation ja auch nur um Fälle, bei denen alle anderen verfügbaren Verfahren ausgereizt wurden – um Schwerstkranke also. Das ist wichtig.

Spektrum: Könnte die Integration von Neuroimplantaten ins Gehirn unser Menschenbild verändern, unser Verständnis von Autonomie und Verantwortung?

Grunwald: Zunächst nicht. Denn die Forschung, die im Moment läuft, ist ganz eindeutig therapeutisch orientiert. Es steht der kranke, auf Hilfe hoffende Mensch im Vordergrund, und insofern ist dies ärztliches Handeln, wie wir es auch aus anderen Bereichen kennen – selbst wenn es das Gehirn betrifft, zu dem wir nun mal ein ganz besonderes Verhältnis haben. Wenn man jedoch weiterdenkt, sich vorstellt, dass mit solchen technischen Mitteln einmal ganz andere Dinge steuerbar werden – etwa durch einen Chip im Kopf, der auf Knopfdruck gute Laune erzeugt, kognitive Fähigkeiten verbessert oder das Gehirn auf bestimmte Fähigkeiten fokussiert, um insgesamt die Leistungsfähigkeit zu verbessern –, dann können ganz andere Dinge passieren.

Spektrum: Wo liegt hier die Brisanz?

Grunwald: Ein Chip im Gehirn, der mit Nervenzellen kommuniziert, kann abgefragt und von außen gesteuert werden. Die Datenleitungen gehen in beide Richtungen. Hier ist eine Außenkontrolle nicht auszuschließen. Man muss sich Gedanken machen, wie sich einem möglichen Missbrauch vorbeugen lässt, sprich, einer Fernsteuerung von Menschen. Wenn ein Chip im Kopf jedoch zur Verbesserung des Gedächtnisvermögens oder der Rechenleistung des Gehirns eingesetzt würde, auch des gesunden, bin ich zögerlich, hier etwa von Autonomieverlust zu sprechen. Denn solange der Mensch klaren Verstandes sein Einverständnis gibt und Kontrolle über diesen Chip hat, gibt es zumindest auf individueller Ebene keine Probleme.

Spektrum: Und auf der gesellschaftlichen Ebene?

Grunwald: Dort sieht es in der Tat anders aus. Denn Verbesserung durch ein Neuroimplantat, ein technisches Neuroenhancement, wird sich nicht jeder Gesunde leisten können, da dies vermutlich sehr teuer sein wird. Die Gesellschaft könnte in Verbesserte und Nicht-Verbesserte zerfallen. Der Status des normalen Menschen wird auf diese Weise womöglich abgewertet, Nicht-Verbesserte könnten beispielsweise Schwierigkeiten im Berufsleben bekommen.

Spektrum: Also wäre Neuroenhancement auch eine Frage der Gerechtigkeit?

Grunwald: Auf jeden Fall. Generell verhält es sich beim technischen Fortschritt so, dass die Privilegierten letztlich stärker profitieren. Wir haben in unserer Gesellschaft zwar zahlreiche Kompensationsmöglichkeiten geschaffen, um zu große Ungerechtigkeit zu vermeiden und auch den Zugang zu neuen Technologien gerecht zu verteilen. Aber das Neuroenhancement wäre hier eine Herausforderung ganz neuer Art.

Spektrum: Was ist eigentlich schlecht daran, wenn Menschen sich mit Hilfe von Technik weiterentwickeln wollen? Organisationen wie die World Transhumanist Association halten es sogar für moralisch geboten, moderne Techniken zu nutzen, um uns körperlich, psychisch oder mental zu verbessern.

Grunwald: Hinter dem Transhumanismus steckt eine quasireligiöse Erlösungsvorstellung: die Idee, dass der Mensch, so wie er ist, nicht so gut geraten sei und er jetzt die Chance und die Pflicht habe, sich zu verbessern. Das halte ich vor dem Hintergrund der Frage, was »verbessern« eigentlich bedeutet, für sehr gefährlich. Auch die Nationalsozialisten und die Sowjetkommunisten wollten den Menschen verbessern – die einen durch Züchtung, die anderen durch Propaganda und entsprechende ideologische Erziehung. Man muss sich aber immer fragen: Was heißt hier verbessern?

Spektrum: Tod und Krankheit letztlich abschaffen, zum Beispiel?

Grunwald: Bei den amerikanischen Transhumanisten ist das die maßgebliche Motivation – auch durchaus nachvollziehbar, denn niemand will krank sein oder sterben. Aber ob das eine Verbesserung des Menschen darstellt? Wie steht es etwa mit sozialen oder hermeneutischen Fähigkeiten, mit moralischer Kompetenz? Es ist wichtig, sich einmal zu überlegen, welche Konsequenzen es für die nichttechnischen Kompetenzen des Menschen hat, wenn man ihn technisch verbessert.

Spektrum: Noch mehr Unbehagen bereitet, dass die zentrale Forschungsprojektagentur des Pentagons etwa massiv bestimmte wissenschaftliche Arbeiten zum Neuroenhancement fördert. Sie spekuliert darauf, Anwendungen könnten ihren Soldaten einmal Vorteile auf dem Schlachtfeld verschaffen.

Grunwald: Hier handelt es sich um eine klare Instrumentalisierung von Menschen. Für mich persönlich ist es eine ganz unangenehme Vorstellung, dass etwa Piloten einmal nur durch ihre Gedanken ihren Kampfjet steuern. Sofern die Soldaten jedoch nicht dazu gezwungen würden, sich diese Implantate einpflanzen zu lassen, fällt es nicht leicht, hier starke ethische Gegenargumente zu finden. Denn die Kriegsführung als solche ist, wenn man bestimmte völkerrechtliche Standards zu Grunde legt, ethisch gemeinhin akzeptiert. Soldaten für die Schlacht auszurüsten, ist alte militärische Tradition. Und mit Blick auf die Geschichte muss ich leider sagen, dass eine solche Entwicklung in gewisser Weise ganz auf der Linie des militärisch-technischen Fortschritts der letzten Jahrhunderte liegen würde.

Spektrum: Man könnte vielleicht entgegnen, dass eine solche Kriegsführung gegenüber schlechter gerüsteten Heeren unfair wäre.

Grunwald: Es war auch unfair, dass die Ägypter ihre Feinde mit Streitwagen bedrängt haben, während diese keine hatten. Eine solche Asymmetrie, die eine technische Überlegenheit mit sich bringt, hat immer schon Kriege entschieden. Wir verlagern jetzt einfach die Technik in den Menschen selbst hinein, das ist das Neue. Aber die Grundüberlegung, durch technischen Fortschritt möglichen Feinden gegenüber einen Vorteil erlangen zu wollen, gibt es seit Jahrtausenden.

Spektrum: Zurück zur Zivilgesellschaft – glauben Sie denn, dass dort die Verlagerung der Technik in den menschlichen Körper zunehmen wird?

Grunwald: Ich kann mir hier gut ähnliche Entwicklungen vorstellen wie in der Schönheitschirurgie. Die ist im Grunde ja auch eine Form des technischen Enhancements. Ich sehe kein ethisches K.-o.-Argument, um diese Entwicklungen zu verhindern. Beim reproduktiven Klonen etwa waren die ethischen Bedenken so klar, dass diese Technik in relativ kurzer Zeit weit gehend verboten wurde. So etwas wird bei den Enhancement-Technologien nicht geschehen. Ich denke, es wird für sie einen Markt geben. Wir werden damit umzugehen haben.

Die Fragen stellte **Tanja Krämer**.

▷ dere Hirnregion als bei der Mayberg-Studie. Dieser haselnussgroße Hirnkern gilt als zentrale Informationsleitstelle des Belohnungssystems. Hierüber verarbeitet das Gehirn die Freude über Geldgewinne oder schöne Musik, steuert die Motivation, sich auf eine Prüfung vorzubereiten, und weckt Vorfreude auf als angenehm oder befriedigend erlebte Dinge.

Bei einer bestimmten Gruppe von Depressiven, so zeigen bildgebende Verfahren, ist die Funktion dieses Bereichs gestört. Erlebnisse, die früher Freude bereitet hätten, hinterlassen nun keinen positiven Eindruck mehr, Vorfreude kommt nicht mehr auf, jede Anstrengung erscheint sinnlos, das Leben leer. Stimulierten die Neuroimplantate den unzureichend aktiven Kern jedoch anhaltend, so war nach einer Woche sein Stoffwechsel gestiegen, ein Indiz für höhere neurale Aktivität. Auch Abweichungen in anderen Regionen, die mit dem Kern in Zusammenhang stehen, normalisierten sich. Direkt nach Beginn der Stimulation wurden die Probanden merklich ruhiger und entspannter, ihre Wangen rosiger. Ihr Interesse an der Umwelt nahm zu, ihre Freudlosigkeit ab – je nach Patient jedoch in unterschiedlichem Maß. Wurde der Pulsgeber wieder abgeschaltet, verschlechterte sich der Zustand aller Probanden, bei zweien indes so dramatisch, dass diese vorgesehene vierwöchige Kontrollphase verkürzt werden musste, um die Patienten nicht zu gefährden.

Wurde der Pulsgeber abgeschaltet, verschlechterte sich der Zustand teilweise dramatisch

Den noch sehr vorläufigen Ergebnissen nach könnte diese Art der Tiefenhirnstimulation also ebenfalls helfen, wenn sie auch, so warnen die Autoren der Studie, sicherlich kein Allheilmittel werden wird. Negative Effekte waren interessanterweise nicht zu beobachten.

Die Idee, ein solches Verfahren bei psychiatrischen Erkrankungen zu testen, geht unter anderem auf eine der Schattenseiten der Tiefenhirnstimulation bei Bewegungsstörungen zurück. Eine Nebenwirkung zeigte nämlich, dass die Neuroimplantate Emotionen beeinflussen konnten: Einige Parkinsonpatienten mit Hirnimplantat verhielten sich während der Stimulation auffallend fröhlich. »Sie erleben einen Zustand des Überglücks«, erklärt Marcos Tatagiba, Direktor der Klinik für Neurochirurgie am Universitätsklinikum Tübingen: »In manchen Fällen wird auch eine erhöhte Sexualität beschrieben.« In seltenen Fällen jedoch bezahlten die Patienten für ihre neu gewonnene Bewegungsfreiheit irritierenderweise mit tiefer Traurigkeit. Die Neuroimplantate veränderten offenbar ihre Persönlichkeit.

»Wenn die Stimulation ausgeschaltet ist, bin ich tot. Ist sie an, lebe ich.« So zitierte der Mediziner Pierre Pollak von der Joseph-Fourier-Universität im französischen Grenoble in einer Studie von 2004 die Aussage einer Patientin, der er wegen ihrer Parkinsonerkrankung einen »Hirnschrittmacher« implantiert hatte. Die motorischen Störungen bekam der Arzt gut in den Griff, doch die psychische Veränderung war offensichtlich: »Wenn die Stimulation zur Beobachtung ihrer Motorik ausgeschaltet war, überkam die Patientin sofort eine überwältigende Traurigkeit. Sie zerfloss in Tränen und erlebte eine starke Verschlechterung ihrer Parkinsonsymptome.«

Tiefenhirnstimulation gegen übermächtige innere Zwänge

In der Anfangszeit der neurotechnischen Parkinsonbehandlung dachten die Ärzte bei solchen Beobachtungen noch, dass ihre Patienten überreagierten – schließlich waren diese nach langem Leiden plötzlich überwiegend wieder in der Lage, sich fast frei und normal zu bewegen. Doch schon bald erkannten sie, dass die Stimulation selbst etwas damit zu tun hatte. Denn auch bei bestimmten Gehirnverletzungen nach Unfällen können starke Veränderungen in der Stimmung der Kranken entstehen. Bildgebende Verfahren zeigten schließlich, dass bei ähnlichen Änderungen jeweils dieselben Hirnbereiche in ihrem Aktivitätsmuster verändert waren.

Bereits ab Ende der 1990er Jahre testeten Mediziner die Tiefenhirnstimulation bestimmter Bereiche auch bei starken Zwangsneurosen – nicht ohne Erfolg. ▷

▷ Im Lauf der Behandlung nahm häufig das unwiderstehliche Bedürfnis ab, sich beispielsweise andauernd zu waschen. Derartige Zwänge können so übermächtig werden und so große Probleme bereiten, dass die Patienten an Selbstmord denken. Inzwischen haben mehrere Forschergruppen Berichte vorgelegt, noch sind aber die Fallzahlen für die verschiedenen Methoden zu klein.

Bevorzugter Ansatzpunkt ist bei den meisten Gruppen der vordere Schenkel der inneren Kapsel *(Capsula interna)*, in dem Fasern von der Stirnregion zum Thalamus laufen (Letzterer ist unter anderem eine Schalt- und Integrationszentrale für Sensorik und Motorik). In historischen Untersuchungen hatte die gezielte Schädigung dieses Bereichs beachtliche Erfolge bei schweren Zwangsstörungen erbracht, aber auch Probleme. Die Vorteile der Tiefenhirnstimulation im Vergleich zu diesem irreversiblen Eingriff liegen auf der Hand.

Auch bei der Stimulation anderer Gehirnareale bessern sich im Lauf der Zeit die Zwänge deutlich, berichteten Sturm und Joachim Klosterkötter, Direktor der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Köln, in einer Anfang 2007 online veröffentlichten Publikation. Sie selbst konnten mit einer Reizung des *Nucleus accumbens* bei Zwangspatienten in einer eigenen Studie gute Erfolge vermelden.

Dass sich eine einstige Nebenwirkung zur Therapie mausert, ist ein Glücksfall. Kritiker befürchten aber, findige Mediziner könnten aus verschiedenen Nebenwirkungen der Tiefenhirnstimulation buchstäblich Kapital schlagen – durch Einsatz bei Gesunden. Der Neurochirurg Rees Cosgrove von der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts) etwa berichtete in einer Anhörung vor dem President's Council on Bioethics von einer Patientin, die er wegen ihres Tourette-Syndroms behandelt hatte. Die unberechenbaren, zwanghaften Zuckungen ihres Kopfes, so genannte Tics, drohten ihr Sehvermögen zu schädigen – ein fataler Verlust für die intelligente Grafikdesignerin. Nach dem Anschalten des Neuroimplantats nahmen wie erhofft ihre störenden Zuckungen ab. Ihr Arbeitgeber aber war über etwas anderes begeistert: Die Entwürfe seiner Angestellten seien in ihrer Farbwahl und ihrem Layout deutlich schöner geworden. Die Tiefenhirnstimulation hatte, wie es schien, ihre Kreativität gesteigert.

Das Pentagon ist interessiert

Ein klarerer Kopf, bessere analytische Fähigkeiten oder die Kunst, kreativ um die Ecke zu denken – all dies könnte nach Ansicht Cosgroves durch die Stimulation mit künftigen Neurochips theoretisch möglich werden. Entgegnen können Experten solchen Vermutungen wenig. Denn obwohl inzwischen mehrere tausend Menschen mit therapeutischen Elektroden im Kopf zur Arbeit gehen, ist die genaue Wirkung noch weit gehend ungeklärt. Einem älteren Erklärungsmodell zufolge schaltet die ständige Reizung überaktive Bereiche schlichtweg aus; das Parkinsonzittern beispielsweise verschwindet wie auf Knopfdruck. Doch bei psychiatrischen Erkrankungen stellt sich der volle Effekt oft erst nach Wochen ein – ähnlich wie bei einer medikamentösen Behandlung, wenn sie anschlägt. Es muss also mehr dahinterstecken als das bloße Abschalten einzelner stimulierter Hirnbereiche, zumal auch Aktivierungen zu beobachten sind. Es sieht eher so aus, als müsse sich auch eine neue Balance innerhalb komplexer Regelkreise einstellen, in die der jeweils anvisierte Hirnbereich eingebunden ist. Die Wirkungen der Elektrostimulation, geben denn auch Experten zu, sind komplexer als bislang vermutet. Und damit potenziell auch die Bandbreite der Anwendungen.

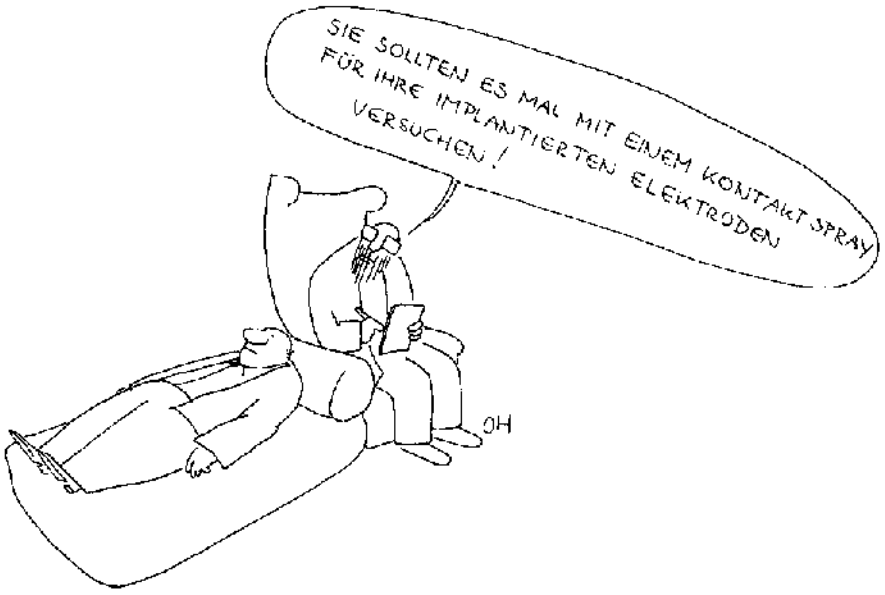
Kritiker befürchten, findige Mediziner könnten aus verschiedenen Nebenwirkungen der Tiefenhirnstimulation buchstäblich Kapital schlagen

Komplexer werden auch die Neuroimplantate der Zukunft. Die Verbesserung kognitiver Fähigkeiten hat sich zum Beispiel Theodore Berger von der Universität von Südkalifornien in Los Angeles zum Ziel gesetzt. Er forscht an einem Elektrochip, der Alzheimerpatienten die Erinnerungsfähigkeit zurückgeben soll. Momentan ist er über erste Tests an Rattenhirnen in Kulturschalen noch nicht hinaus. Doch das US-Militär findet seine Forschungen schon jetzt so interessant, dass es sie von der Defence Advanced Research Projects Agency (Darpa), der zentralen Forschungsagentur des Pentagons, in Millionenhöhe fördern lässt. Die Symbiose von Mensch und Maschine gilt besonders für Kriegsszenarien als zukunftsträchtige Technik. »Unser Programm ›Enhanced Human Performance‹ soll bewirken, den Menschen nicht zum schwächsten Glied im US-Militär werden zu lassen«, erklärte etwa der frühere Darpa-Direktor Anthony Tether 2003 in einer Rede vor dem Repräsentantenhaus.

Hierzu soll unter anderem das US-amerikanische »Augmented Cognition Program« beitragen. Sein Ziel: durch das Verschmelzen von Mensch und Computer die Leistungsfähigkeit zu steigern. Piloten könnten so in Zukunft ihre Kampfflugzeuge allein kraft ihrer Gedanken steuern (siehe dazu das Interview S. 46). Doch auch über Rückverknüpfungen wird nachgedacht: So, wie die Soldaten mit ihrem Geist die Maschine lenken, soll eine Maschine wiederum den Geist kontrollieren können – damit wichtige Informationen beispielsweise nur dann übermittelt werden, wenn das Gehirn aufnahmefähig ist. Und Wissenschaftler des Media-Labors des Massachusetts Institute of Technology im amerikanischen Cambridge etwa arbeiten an Sensoren, die emotionales Befinden wie »gestresst sein« verraten – mit finanzieller Unterstützung von Darpa und Navy.

Doch wie verändert sich eine Gesellschaft, wenn Studenten eines Tages mit »Brainchips« die eigene Denkfähigkeit verbessern, Werbedesigner per Knopfdruck ihre Kreativität steigern oder Mütter sich mit Neuroimplantaten glücklicher tunen, um geduldiger mit ihren Kindern zu sein? Was für Kriege werden wir in Zukunft führen, wenn sich aufgemotzte Supersoldaten gegenüberstehen?

Solche Fragen beschäftigten die Mitglieder des amerikanischen President's Council for Bioethics derart, dass sie 2003 eigens eine Studie verfassten. In dem über 300 Seiten starken Buch »Beyond Therapy« (Jenseits der Therapie) warnen die Ethiker, dass die Technisierung des Körpers unser gesamtes Welt-



und Menschenbild gründlich auf den Kopf stellen würde – und wir uns fragen sollten, welche Werte wir eigentlich im Zuge des Fortschritts in den Mittelpunkt unseres Handelns stellen sollten: Die Besorgnis bestehe, »die ungeheuren neuen Fähigkeiten, gewisse ganz vertraute und oft in bester Absicht verfolgte [zutiefst menschliche] Wünsche zu erfüllen, könnten uns blind machen für die höhere Bedeutung unserer Ideale und unser Empfindungsvermögen dafür schmälern, wie es ist, zu leben, frei zu sein und nach Glück zu streben.«

Werden Gesunde zu solchen Techniken greifen?

Für den Neurochirurgen Marcos Tatagiba von der Universität Tübingen, in dessen Klinik zahlreiche Parkinsonpatienten mit Hirnschrittmachern versorgt wurden, ist solche Besorgnis übertrieben: »Ich glaube nicht, dass irgendein normaler Mensch sich ein Neuroimplantat einpflanzen lassen würde, nur um seine Leistung zu steigern.« Er warnt davor, durch sensationelle Berichterstattung über mögliches Neuroenhancement die konkreten klinischen Erfolge der Neuroimplantate (auch wenn Nebenwirkungen nicht zu leugnen sind) in den Schatten zu rücken.

Früher blieben als letzter Ausweg nur das Skalpell oder Varianten wie Elektrokoagulation und spezielle Laser-Messer. Die funktionsgestörten Hirnareale wurden schlichtweg zerstört. Wenn hierbei etwas schiefging, war der Schaden irreversibel. Die Anwendung solcher ablativen Verfahren bei verschiedenen psychischen Erkrankungen in den 1950er und 1960er Jahren rief zudem viel Kritik hervor. Andere Methoden gab es jedoch für nicht Therapierbare bis in die 1990er Jahre nicht.

Tatagiba sieht eine ganz andere Problematik: »Die Gefahr liegt auf der Hand, dass Methoden wie die Tiefenhirnstimulation missbraucht werden könnten, um auch leichte Formen der Depression zu behandeln.« Sein amerikanischer Kollege Cosgrove sieht dies ähnlich. Sobald genauere Vorhersagen über die Wirkung der Stimulationen möglich seien, werde auch die Hemmschwelle sinken, schon bei leichten psychischen Erkrankungen zur Elektrode zu greifen, erklärte er den Mitgliedern des President's Council on Bioethics in einer Anhörung im Jahr 2004. Auch bei Parkinson- und Epilepsiekranken sei man letztlich dazu übergegangen, schon bei frühen Symptomen mit Neuroimplantaten einzugreifen – weil dann die Erfolge besser sind.

Die Hersteller zumindest haben erkannt, dass sich hier ein interessanter Markt entwickeln könnte. Schließlich ist der Anteil therapieresistenter Menschen bei psychiatrischen Erkrankungen erstaunlich hoch: bei Zwangspatienten etwa zwanzig Prozent, bei Schwerstdepressiven gar ein knappes Drittel. Zudem hat die echte Depression Ausmaße einer Volkskrankheit erreicht (allein in Deutschland leiden schätzungsweise mindestens vier Millionen Menschen daran).

Die Firma Cyberonics, mit Hauptsitz in Houston (Texas), vertreibt ein Implantat, das keine Elektroden im Gehirn selbst erfordert, sondern den kurz als Vagus bezeichneten zehnten Hirnnerv reizt, der seitlich am Hals entlang verläuft. Er dient hier als Reizüberträger zum Gehirn (siehe untere Grafik im Kasten S. 45). Diese Art der Stimulation wird inzwischen häufig bei bestimmten Formen der Epilepsie angewandt, um Anfälle zu mindern. In Europa ist dieses Gerät seit 1994 dafür verfügbar. Auch bei der Vagusnerv-Stimulation hatten sich aber stimmungsaufhellende Nebenwirkungen eingestellt, und seit 2005 ist das Gerät in den USA als ergänzende Behandlung für schwere Depressionen zugelassen, wenn andere Therapien nicht ausreichen oder intolerabel sind.

Nun wirbt die Firma in den Staaten auf ihren Patienten-Webseiten für den Einsatz – obwohl die vorgelegten Daten kein einstimmiges Votum zu Gunsten der Zulassung erbracht hatten. Das medizinische Risiko der Operation ist geringer als bei der Tiefenhirnstimulation, die Hemmschwelle für eine solche Operation bei Patienten daher wohl niedriger. Werden auch Gesunde einmal zu ähnlichen Techniken greifen? Technikphilosoph Armin Grunwald, Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse in Karlsruhe, ist überzeugt: »Sobald so etwas möglich ist, entwickelt sich auch eine Nachfrage danach.« ◁

Tanja Krämer ist Magistra der Philosophie und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Bremen mit Schwerpunkt auf bioethischen Themen.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Tiefenhirnstimulation bei psychiatrischen Erkrankungen. Von J. Kuhn et al. in: Fortschritte der Neurologie und Psychiatrie, Online-Vorabveröffentlichung, 17. Januar 2007, doi: 10.1055/s-2006-955055

Neuroenhancement. Ethik vor neuen Herausforderungen. Von Bettina Schöne-Seifert, Johann S. Ach und Uwe Opolka. Mentis Verlag, 2007

Deep brain stimulation to reward circuity alleviates anhedonia in refractory major depression. Von Thomas Schläpfer et al. in: Neuropsychopharmacology, Online-Vorabveröffentlichung, 11. April 2007, doi: 10.1038/sj.nnp.1301408

Beyond therapy. Biotechnology and the pursuit of happiness. Vom President's Council on Bioethics. Regan Books, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/896270.

TEXTERKENNUNG

Rasterfahndung nach der richtigen Type

Anhand von Mustern und Merkmalen lernen Computer Buchstaben und Wörter zu lesen.

Von Mark Fischetti und Klaus-Dieter Linsmeier

Sie möchten einen Artikel dieser Ausgabe in einem Vortrag zitieren, verspüren aber wenig Lust, die betreffende Passage abzutippen? Kein Problem: Ein Scanner macht aus Gedrucktem ein elektronisch gespeichertes Bild, eine gute Texterkennungssoftware extrahiert daraus Buchstaben, Wörter, Sätze.

Es gilt zunächst, die zum Text gehörenden Bereiche einer digitalisierten Seite, also eines Rasters von schwarzen und weißen Punkten, von anderen zu unterscheiden, beispielsweise von grafischen Elementen oder Verunreinigungen, sodann eine Zeilenstruktur zu erkennen und in den Zeilen die durch Leerräume abgetrennten Wörter und Zeichen. Anschließend erfolgt eine Fehlerkorrektur durch den Vergleich von Pixeln mit ihren Nachbarn. Dabei mag sich herausstellen, dass ein geschwärzter Bildpunkt nur ein Artefakt ist – er wird dann vor der Weiterverarbeitung auf die Papierfarbe gesetzt – oder umgekehrt ein Pixel des Werts »Weiß« eigentlich zum Buchstaben gehört, was dann ebenfalls korrigiert wird.

Zu den Grundlagen der Optischen Zeichenerkennung (Optical Character Recognition, OCR) gehören Techniken der Mustererkennung. Diese analysieren die zu einem Zeichen gehörenden Felder und vergleichen sie mit Einträgen in Datenbanken. Die Trefferquote steigt, wenn sich die Software auf die jeweils zu erwartenden Schriftarten trainieren lässt. Ergänzend zum Vergleich der Pixelmuster lassen sich auch geometrische Merkmale wie Linien, Kreise und Bögen der Zeichen beschreiben. Auf diese Weise sind bereits etwa achtzig Prozent der Buchstaben korrekt zu erkennen.

Techniken der Intelligenten Zeichenerkennung (Intelligent Character Recognition, ICR) bewerten das Ergebnis der Buchstabenerkennung nach statistischen und linguistischen Kriterien. Deutet die OCR-Stufe ein Zeichen beispielsweise als »ß«, die folgenden als Buchstabenfolge »rücke«, so würde durch einen Abgleich mit Wörterbüchern »ß« zu »B« korrigiert. Dank heutiger Computertechnik benötigen die Programme nur wenige Sekunden für eine gescannte Seite. Die Ergebnisse der verschiedenen Algorithmen werden miteinander verglichen und es wird eine Entscheidung über die wahrscheinlichste Annahme getroffen. Auf diese Weise erhöht sich die Trefferquote auf mehr als 99 Prozent.

Selbst bei handgeschriebenen Druckbuchstaben beträgt die Genauigkeit noch zirka 95 Prozent. Sind Zeichen nicht mehr durch Leerräume abgegrenzt, helfen Verfahren der Intelligenten Worterkennung (Intelligent Word Recognition, IWR). Diese analysieren etwa die von den Buchstaben erzeugten Wortumrisse und vergleichen sie mit den Einträgen in einem Wörterbuch. Dergleichen Techniken arbeiten verlässlich, wenn die Zahl der Wortkandidaten und die Textfeldgröße begrenzt sind, wie bei Schecklesesystemen.

Die Eingabe handschriftlicher »Notizen« in einen PDA (Personal Digital Assistent) basiert auf der so genannten Online-Texterkennung: Während des Schreibens verfolgt eine Software die Bewegungen des Spezialstifts auf einem Schreibfeld, notiert sein Aufsetzen und sein Abheben sowie die Bewegungsinformationen. Zudem verwenden die Nutzer meist eine vereinfachte Druckbuchstabenschrift namens Graffiti; Klein- und Großbuchstaben sowie Zahlen werden in unterschiedliche Bereiche eingetragen.

Es gibt noch viel zu tun. Die Entwickler von OmniPage konzentrieren sich auf Sprachen wie Arabisch, Japanisch und Chinesisch, Schriften also, die ganze Wörter durch einzelne Zeichen kodieren. Das deutsche Unternehmen PrePress Systeme in Bad Homburg entwickelt ein System, um Zeitungen und Zeitschriften einzuscannen und zu archivieren. Das klingt zunächst einfach, doch mehrspaltiger Druck, Grafiken und Fotos im Text ergeben eine sehr komplexe Gesamtstruktur. Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme sowie dem Verlag Die Zeit arbeiten die Wissenschaftler nun daran, die in eine Textdatei übertragenen Beiträge nach Wissensinhalten aufzubereiten.

Ein weiterer Trend: Digitalkameras inklusive solcher in Fotohandys sollen ebenfalls über eine Texterkennungssoftware verfügen. James Bond und seine Kollegen werden sich freuen: Ein schnelles Foto, und schon lässt sich ein Geheimdokument als Textdatei per Mail verschicken.

Mark Fischetti ist Redakteur bei Scientific American, **Klaus-Dieter Linsmeier** bei Spektrum der Wissenschaft.

Handgeschriebene Buchstaben bestehen aus einer Abfolge von Strichen. Sofern sie mit einem speziellen Stift auf einem Grafiktablett oder einem dafür ausgelegten Display geschrieben werden, vermag ein Computer diese vertikalen und horizontalen Bewegungen als Folge von Punkten zu erfassen, die mit dem Aufsetzen des Stifts beginnen und mit seinem Abheben enden. Punkte und Striche werden im Zeitverlauf erfasst und diese Daten sodann gegen eine Referenztabelle abgeglichen.

Wussten Sie schon?

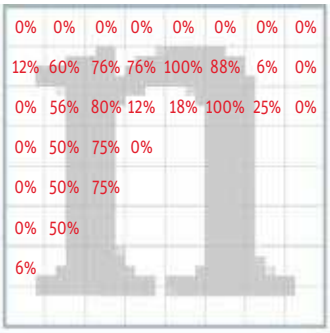
▶ **Europäische und amerikanische Patente** zur automatischen Texterkennung gibt es seit 1929. Die Spionageabteilung der US-Streitkräfte setzte solche Technologien in den 1950er Jahren ein, um Nachrichten leichter entschlüsseln zu können. Wesentliche Impulse lieferte Lawrence Roberts Anfang der 1960er Jahre, damals am Massachusetts Institute of Technology, mit seinen Arbeiten zur Erkennung handgeschriebener Druckbuchstaben mittels Musterkennung; bekannter wurde er allerdings als einer der Gründungsväter des Internets. Erste Produkte setzten den Einsatz eigens entwickelter Schrifttypen (OCR-A bis -H) voraus. Ein entscheidender Fortschritt war OmniPage, ein von Schriftarten unabhängiges OCR-System, 1976 entwickelt von dem Experten für Künstliche Intelligenz Ray Kurzweil.

▶ **Wer den Empfang eines Pakets** auf einem Display quittiert, sollte nicht glauben, dass sein Name wirklich gelesen, also in Buchstaben umgesetzt wird. Das System speichert lediglich den Schriftzug ab. Sollte es Beanstandungen geben, weil eine Lieferung falsch zugestellt wurde, ist es Sache eines Menschen, die Unterschrift zu identifizieren.

▶ **Die von Algorithmen berechneten Merkmale** eines Textmusters werden von so genannten Klassifikatoren weiterverarbeitet. Diese Softwaremodule ziehen Referenztabellen zum Vergleich heran und setzen dabei ihrerseits Algorithmen ein. Zu den gängigsten gehört die Suche nach dem nächsten Nachbarn, also der Vergleich des gegebenen Merkmalsvektors mit jedem Eintrag in der Datenbank und die Berechnung des jeweiligen Unterschieds. Eine andere Klassifizierung nutzt so genannte Markov-Ketten, ein statistisches Verfahren, das eine Prognose darüber abgibt, wie wahrscheinlich Zeichenketten an einer bestimmten Textstelle sind.

Texterkennungssoftware segmentiert die von einem Scanner gerasterte Seite in einzelne Zellen, die Buchstaben enthalten. Algorithmen ermitteln sodann Merkmale, die Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Zeichen ermöglichen. Rechts dargestellt: die Verteilung schwarzer und weißer Bildpunkte (oben), die Zahl und Länge von Linien (Mitte) und die Richtung, in die sich Kurven öffnen (unten).

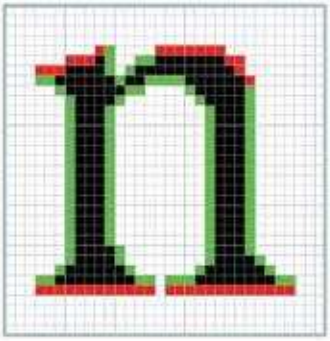
SW INFOGRAPHICS, NACH: NUANCE IMAGING (DRUCKBUCHSTABEN) UND VISION OBJECTS (HANDGESCHRIEBENES)



Merkmal: Farbe

Algorithmus: Matrixvergleich

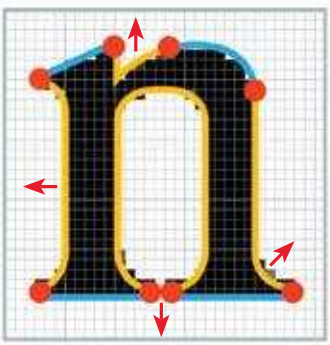
Methode: Anteil schwarzer und weißer Pixel innerhalb einer Zelle bestimmen



Merkmal: Zahl und Länge von Kurven

Algorithmus: Konturerkennung

Methode: Endpunkte und Wendepunkte ermitteln



Merkmal: Richtung von Kurven

Algorithmus: Konturerkennung

Methode: Endpunkte und Wendepunkte ermitteln

Die Schatten galaktischer Welten

Rätselhafte Sternströme könnten Überbleibsel von Minigalaxien sein, auf deren Kosten sich unsere Milchstraße zu einem galaktischen Riesen entwickelte. Um sie zu finden, ist allerdings astronomischer Spürsinn gefragt, denn längst haben sich die fremden Sonnen unauffällig unter hiesige Sterne gemischt.

Von Rodrigo Ibata und Brad Gibson

Welchen Stern auch immer Sie am Nachthimmel entdecken: Jeder einzelne von ihnen gehört zu unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße. Schon die Sonnen der uns am nächsten stehenden der großen Nachbargalaxien bleiben dem unbewehrten Auge verborgen: Andromeda erscheint lediglich als schwacher Nebelfleck. Keine Chance also, jemals die Sterne fremder kosmischer Gefilde zu Gesicht zu bekommen.

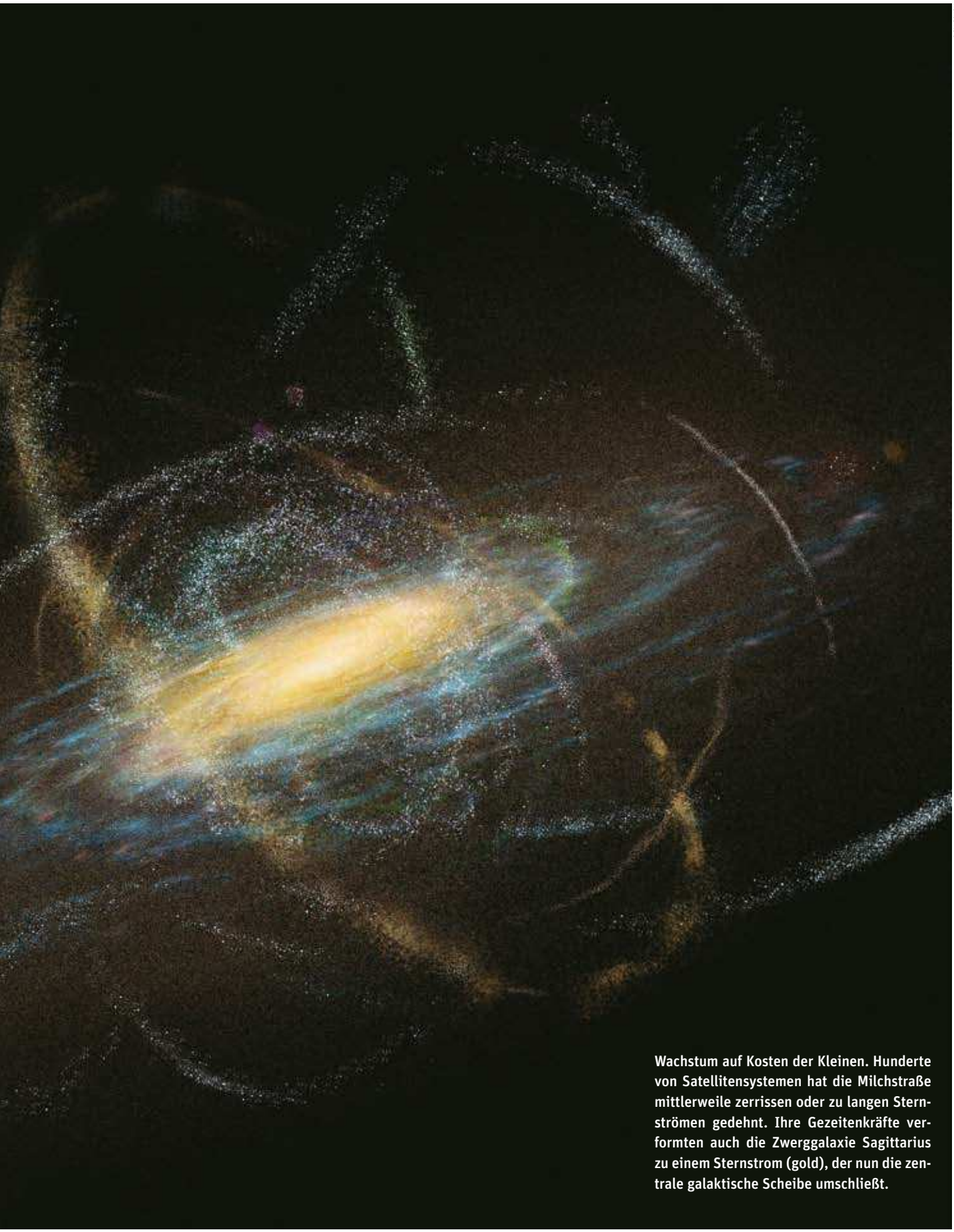
Oder vielleicht doch? Arkturus – zweithellster Stern am Nordhimmel und im Sternbild Bootes zu finden – rüttelt an dem einfachen Bild, dem zufolge die in der Milchstraße geborenen Sonnen ganz unter sich sind. Er bewegt sich ein wenig anders und ist auch chemisch nicht ganz so zusammengesetzt, wie man erwarten würde. Und er ist kein Einzelfall: Arkturus teilt seine etwas schrulligen Eigenschaften mit weiteren stellaren Einzelgängern, die verstreut über die ganze Milchstraße zu finden sind.

Schon seit den 1960er Jahren ist der Ursprung dieser und anderer untypischer Sterne Gegenstand heißer wissenschaftlicher Debatten. Zwang sie die Schwerkraft der Spiralarme auf ihre fremdartig anmutenden Bahnen? Oder sind sie Einwanderer aus galaktischen Welten jenseits der Milchstraße? »Sowohl als auch«, fanden Astronomen in den letzten Jahren dank raffinierter, geradezu kriminalistischer Methoden heraus.

Einige der »eingeborenen« Sterne entstanden tatsächlich auf ungewöhnlichen Bahnen oder wurden durch Schwerkrafteinflüsse in sie hineingezogen. Doch bei überraschend vielen der anomalen Sterne – und auch bei Arkturus – handelt es sich tatsächlich um Einwanderer. Vermutlich allerdings um unfreiwillige, denn ursprünglich gehörten diese Sterne wohl zu kleineren Galaxien, so lange jedenfalls, bis die Milchstraße diese eines Tages einfing und sich einverleibte.

Den Astronomen indessen bieten die Fremdlinge eine große Chance: Gelingt es ihnen, deren Herkunft zu rekonstruieren, schreiben sie damit auch die Entstehungsgeschichte unserer Milchstraße. Und vielleicht ergründen sie sogar die Natur der Dunklen Materie, die nicht nur unsere Galaxis machtvoll beherrscht.

Ein gutes Auge müsste eigentlich genügen, um stellare Immigranten zu erkennen. Angeordnet in langen Stern- ▷



DON DIXON

Wachstum auf Kosten der Kleinen. Hunderte von Satellitensystemen hat die Milchstraße mittlerweile zerrissen oder zu langen Sternströmen gedehnt. Ihre Gezeitenkräfte verformten auch die Zwerggalaxie Sagittarius zu einem Sternstrom (gold), der nun die zentrale galaktische Scheibe umschließt.

Eine Galaxie wird zerrissen

Unglückselige Zwerggalaxie. Die Computersimulation zeigt, wie sie von den Gezeitenkräften der Milchstraße deformiert wird und sich schließlich ganz auflöst.

△ **Vor drei Milliarden Jahren:** Die Zwerggalaxie hat sich weit gehend unabhängig von anderen Masseansammlungen entwickelt und begegnet erstmals der Milchstraße.

△ **Vor zwei Milliarden Jahren:** Vier nahe Vorübergänge an der galaktischen Scheibe haben die Zwerggalaxie auseinandergezogen und einige ihrer Sterne herausgerissen. Je nach Geschwindigkeit blieben diese hinter der Zwerggalaxie zurück oder eilen ihr nun voraus.

▷ strömen, sollten sie auffallen wie eine Polonaise auf der Tanzfläche. Viele solcher Ströme zusammengenommen erscheinen sogar als regelrechter Pfad aus Sternen, dessen Ausgangspunkt in einem Kugelsternhaufen oder einer Satellitengalaxie der Milchstraße liegt.

In der Praxis jedoch sind Sternströme schwierig zu finden, weil sie sich kaum von der recht gleichmäßigen Verteilung der heimischen Sterne abheben. Viele jüngere Entdeckungen haben sich daher eines Verfahrens aus der Nachrichtentechnik bedient, das bereits im Zweiten Weltkrieg entwickelt wurde. Die »matched filter«-Technik diente ursprünglich dazu, bessere Bilder von nahenden Flugzeugen zu erhalten. Sie filtert Information auch aus stark rauschenden Signalen heraus, indem sie darin nach bestimmten erwartbaren Strukturen sucht. Angewandt auf den Nachthimmel, lässt sich so die elektromagnetische Strahlung der heimischen Sterne aussortieren – vorausgesetzt, man hat bereits eine ungefähre Vorstellung davon, welche räumlichen Strukturen von ihnen und den Einwanderern gebildet werden.

Das wohl eindrucksvollste Beispiel eines Funds fremder Sonnen ist der Sagittarius-Strom, den einer von uns (Ibata) gemeinsam mit seinen Kollegen 1994 entdeckte und der die Milchstraße wie eine gewaltige Halskette umgibt. Schätzungsweise 200 Millionen Sterne bilden diesen rund eine Million Lichtjahre langen Strom.

Nur noch ein Schatten ihrer selbst

Sein Ursprung liegt in der Sagittarius-Zwerggalaxie, einer der 15 bis 20 Minigalaxien, die die Milchstraße umkreisen wie Monde einen Planeten. Das größte dieser Systeme ist mit etwa einem Zehntel der Milchstraßenmasse die Große Magellansche Wolke. Sagittarius bringt es immerhin auf ein Hundertstel der Masse und die kleinsten Exemplare nur auf knapp den millionsten Teil.

Doch die Milchstraße lässt ihre Trabanten nicht in Ruhe leben. Sagittarius als eines ihrer Opfer stirbt schon seit Jahrmilliarden einen langsamen Tod: Die Galaxie ist nur noch ein Schatten ihrer selbst und kaum mehr als zusammenhängender Körper zu erkennen. Anderswo sieht es nicht besser aus. Auch weitere galaktische Nachbarn werden derzeit auseinandergerissen, teilweise ist ein Sternstrom alles, was von ihnen noch übrig ist (siehe Tabelle S. 57). In selteneren Fällen wie bei der Großen Magellanschen Wolke verlieren die Satelliten bislang nur ihr Gas, noch nicht aber die Sterne (siehe auch »Ewig junge Milchstraße«, Spektrum der Wissenschaft 4/2004, S. 46).

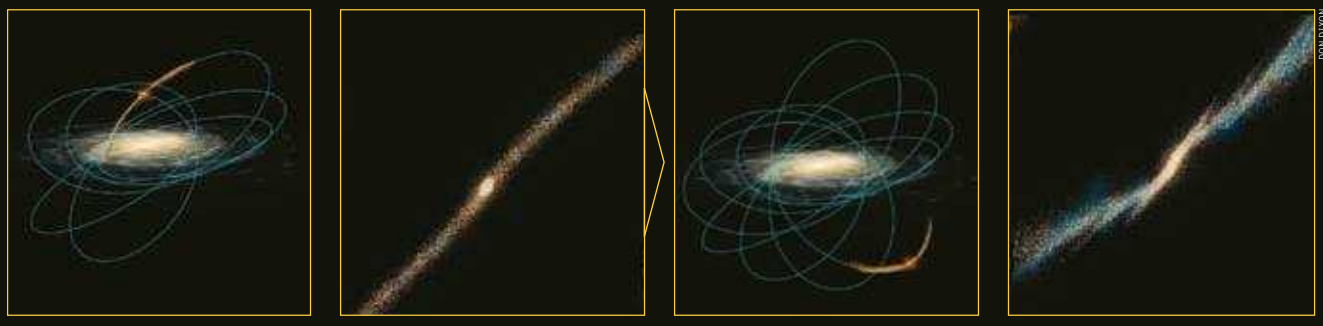
Der Mechanismus, der die kleinen Galaxien zerstört, ist uns vertraut: Es

In Kürze

▶ **Unsere Milchstraße** hat sich aus mehreren Hundert galaktischer »Bausteine« gebildet. Ihre Gezeitenkräfte zerren an allen kleinen Galaxien und Sternhaufen, die sich ihr zu sehr nähern, und entreißen ihnen dabei ihre Sonnen. Diese bilden allmählich einen langen Sternstrom um die Milchstraße und werden schließlich von dieser geschluckt.

▶ Selbst **Sternströme**, die erst in jüngerer Vergangenheit entstanden, heben sich kaum vom Rest der Milchstraße ab. Doch feine Muster in der Sternbewegung und Besonderheiten in der chemischen Zusammensetzung verraten ihren wahren Ursprung. Mittels der Erfassung von einer Milliarde Sterne – rund ein Prozent der Galaxis! – wollen die Astronomen die Einwanderer aufspüren und so auch rekonstruieren, wie sich die Milchstraße zu ihrer heutigen Größe entwickelte.

▶ Auch auf neue Erkenntnisse über die **Dunkle Materie**, in die unsere Milchstraße eingebettet ist, können die Astronomen jetzt hoffen. Die Form der Sternströme nämlich hängt von Menge und Verteilung dieses unsichtbaren Stoffs ab.



△ **Vor einer Milliarde Jahren:** Die Zwerggalaxie befindet sich in ernsthaften Schwierigkeiten. Die meisten ihrer Sterne bilden nun einen Zehntausende von Lichtjahren langen Strom entlang der Bahn der Zwerggalaxie.

△ **heute:** Die Zwerggalaxie löst sich endgültig auf. Der von ihr gespeiste Sternstrom verbreitert sich allmählich und seine Sterne beginnen, sich mit denen der Milchstraße zu vermischen.

sind die Gezeitenwirkungen der Milchstraße. Ähnlich wie der Mond für Ebbe und Flut auf der Erde sorgt, zerrt auch die Galaxis an ihren Satelliten, deformiert sie und reißt sogar einzelne Sterne aus ihnen heraus (siehe Kasten oben).

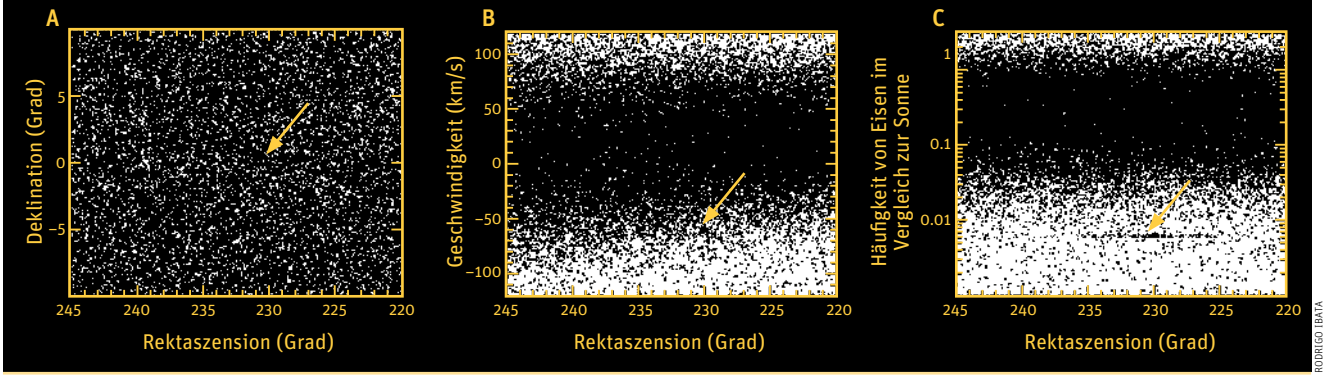
Das Ende ist absehbar: Die Milchstraße wächst auf Kosten ihrer Nachbarn. Diese Erkenntnis jedoch wurde erst aus Beobachtungen gewonnen und ist keineswegs trivial. Vielmehr hat sie die Theorie der Galaxienentstehung geradezu revolutioniert. Früher nämlich vermuteten die Astronomen, alle Galaxien seien ursprünglich direkt aus winzigen Verdichtungen in der ansonsten gleichförmigen Materieverteilung des frühen Universums hervorgegangen und hätten nach einer Phase raschen Wachstums relativ schnell ihre heutige Größe und Form erreicht.

Doch weitere Erkenntnisse, darunter jene über Sternströme, ließen ein anderes Bild entstehen. Heute geht man davon aus, dass lediglich Zwerggalaxien mit bis zu einer Milliarde Sonnenmassen durch solche schnellen Wachstumsprozesse entstanden sind. Große Systeme wie unsere Milchstraße mit Hunderten von Milliarden Sternen haben sich dagegen erst später durch die Verschmelzung von Zwerggalaxien und durch Akkretion, also allmählichen Materiezustrom von Satellitensystemen gebildet (und wachsen noch heute, wenn auch in gemächlicherem Tempo).

Inzwischen stellen sich weitere Fragen. Welchen Anteil haben die Einwanderer an der stellaren Gesamtpopulation der Galaxis? Wie waren die ursprünglichen Nachbargalaxien, die frühen Bausteine der Milchstraße, chemisch zusammengesetzt? Wie veränderten deren chemische Elemente die frühe Geschichte der Galaxis? (Der Kasten auf der Folgeseite beschreibt darüber hinaus, dass Sternströme nicht nur als »Fossilien« der galaktischen Entwicklung von Interesse ▷

Versteckt in der Menge

Nichts zu sehen: Ein Sternstrom kann sich zwischen den heimischen Vordergrundsternen der Milchstraße völlig »unsichtbar« machen (A). Wirft man dagegen einen Blick auf die Geschwindigkeiten (B) oder die chemische Zusammensetzung (C) der Sterne, so ist der Strom deutlich auszumachen. Die Abbildungen stellen eine Region um den im Jahr 2001 entdeckten Sternstrom Palomar 5 dar. (Rektaszension und Deklination sind die Namen der Himmelskoordinaten.)



Sehen, was man nicht sehen kann

Wollen Astronomen die Geschichte der Milchstrasse rekonstruieren, konzentrieren sie sich natürlich auf das, was sie sehen können: die Sterne. Doch diese machen nur einen kleinen Teil der Galaxien aus. Den Löwenanteil bildet eine bislang unbekannte Substanz, die so genannte Dunkle Materie. Alles, was wir über diesen rätselhaften Stoff wissen – und das ist nicht viel –, haben wir aus Beobachtungen von Sternen und Gaswolken gewonnen, auf die er seine Anziehungskraft ausübt.

Daher träumt natürlich jeder, der der Dunklen Materie auf die Spur kommen will, davon, dass er die Bewegung von Sternen während eines kompletten Umlaufs um das Zentrum der Milchstraße verfolgen kann. Denn auf seiner Bahn würde der Stern in Abhängigkeit von der jeweiligen Gravitation mal langsamer werden, mal wieder beschleunigen – und damit verraten, wie die (dunkle) Masse in der Galaxis verteilt ist. Für solche Beobachtungen fehlt aber einfach die Zeit: Sterne benötigen für einen Umlauf mehrere hundert Millionen Jahre.

Einen Ausweg aus dem Dilemma bilden Sternströme. Die Sterne eines solchen Stroms folgen einer gemeinsamen Bahn um die Milchstraße. Auf diese Bahn gelangen sie aber nacheinander, sodass sie in ihrer Gesamtheit jeweils ein Teilstück dieser Bahn sichtbar machen. Unser Team hat auf diese Weise bereits den Sagittarius-Strom vermessen und dabei herausgefunden, dass die Verteilung der Dunklen Materie in der Galaxis nicht ellipsoid ist, wie von Computersimulationen vorhergesagt, sondern kugelförmig.

Interessanterweise stimmt eine solche Verteilung mit den Vorhersagen alternativer Gravitationstheorien überein, zum Beispiel mit denen der »Modifizierten Newton'schen Dynamik«, kurz Mond genannt (siehe auch »Gibt es Dunkle Materie?«, von Mordehai Milgrom, Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 34). Kürzlich bestätigten auch Michael Fellhauer von der University of Cambridge und sein Team unser Ergebnis (siehe Interview auf S. 58).

Vorsicht ist dennoch geboten: Mit Hilfe des Sagittarius-Stroms konnten wir nur eine kleine Region auf die Verteilung der Dunklen Materie hin untersuchen. Bevor wir allerdings sicher sein können, dass die Verteilung wirklich kugelförmig ist, müssen wir noch viele weitere Sternströme analysieren.

Außerdem stellt sich auch die Frage, ob die Dunkle Materie gleichmäßig verteilt ist oder ob sie lokale »Klumpen« – verstanden als Regionen größerer Materiedichte – bildet. Daraus nämlich könnten wir Rückschlüsse auf ihre Zusammensetzung ziehen. Falls sie nur aus Teilchen besteht, die ausschließlich über die Schwerkraft in Wechselwirkung treten, dann gäbe es nichts, was die Klumpenbildung verhindern könnte. Würden die Teilchen allerdings noch auf andere Weise wechselwirken – etwa vermittels der Kernkräfte –, dann könnten sich Klumpen auch auflösen oder gar nicht erst entstehen.

Die Vermessung der Sternströme ist eine der nur wenigen Möglichkeiten, um Verdichtungen Dunkler Materie aufzuspüren. Der Satellit Gaia soll die Positionen und Geschwindigkeiten von Sternen in dünnen Strömen darum so genau vermessen, dass er Klumpen noch auf einer Skala von nur einhundert Lichtjahren nachweisen könnte. Sternströme mit Ausdehnungen, die die ganzer Galaxien übertreffen, könnten uns also eines Tages die Eigenschaften von Teilchen enthüllen, die kleiner sind als Atome.

DON DIXON

▷ sind, sondern auch wichtige Aufschlüsse über die Verteilung der Dunklen Materie geben.)

Bevor man den Einwanderern aber Antworten auf diese Fragen entlocken kann, muss man sie erst einmal finden. Das Problem dabei: Das räumliche Muster, das sie bilden, ist kaum noch erkennbar, wenn sie sich erst einmal unter die Sterne der Milchstraße gemischt haben. Das übliche Vorgehen, nämlich nach Sternen zu suchen, die sich durch bestimmte Positionen und Geschwindigkeiten als Mitglieder einer Gruppe zu erkennen geben, führt uns hier also nicht weiter.

Wir wählen darum einen anderen Weg: Wir messen diese Parameter zwar dennoch – zumindest so gut es geht –, dann aber berechnen wir aus ihnen die Energie des jeweiligen Sterns im Gravitationsfeld der Milchstraße (über das wir einige Annahmen treffen müssen) und seinen Drehimpuls. Das macht die Sache schon einfacher: Während sich die Energie nur wenig verändert, weil der Stern sehr langsam in Richtung der Milchstraße »fällt«, bleibt auch der Drehimpuls in deren Gravitationsfeld mehr oder weniger erhalten. Energie und Drehimpuls können wir nun als Koordinaten in einem abstrakten Phasenraum auffassen, analog zu den Ortskoordinaten im »echten« Raum. Zeichnen wir die vermessenen Sterne schließlich in ein Phasenraumdiagramm ein, so versammeln sich die Gruppenmitglieder, die allesamt über ähnliche Energie- und Drehimpulskoordinaten verfügen, wie von Geisterhand geführt auf einem Fleck und lassen sich jetzt leicht identifizieren.

Forscherteams wie die unter Leitung von Amina Helmi vom Kapteyn Instituut im niederländischen Groningen oder Chris B. Brook von der University of Washington haben so bereits eine ganze Reihe von Zuwanderern in der Milchstraße aufgespürt. Noch allerdings sind die Instrumente nicht präzise genug, um die Bewegung ferner Sterne in allen drei Raumrichtungen (und damit auch den Drehimpuls) zu messen, sodass man bislang nur in der Nachbarschaft des Sonnensystems fündig wurde.

Doch auch eine weitere faszinierende Identifikationsmethode wird derzeit erprobt. Das Verfahren des »chemischen Fingerabdrucks« basiert darauf, dass Sterne meist nicht einzeln entstehen, sondern in Gruppen von bis zu mehreren

Galaktische Stromlandschaft

Immer mehr Sternströme entdecken die Astronomen. Treffen die gegenwärtigen Theorien der Galaxienentstehung zu, hat die Milchstraße Hunderte von kleineren Sternsystemen verschlungen. Die meisten davon haben sich allerdings schon so sehr mit den Sternen der Milchstraße vermischt, dass wir sie wohl nicht mehr werden aufspüren können.

Strom Entdeckungsjahr	wahrscheinlicher Ursprung	geschätzte Masse	geschätzte Länge	Zusammensetzung
Arkturus-Strom 1971	ehemalige Zwerggalaxie	unbekannt	unbekannt	alte metallarme Sterne
Magellan-Strom 1972	Große und Kleine Magellansche Wolke	200 Millionen Sonnenmassen	1 Million Lichtjahre	Wasserstoffgas
Sagittarius-Strom 1994	Sagittarius-Zwerggalaxie	100 Millionen Sonnenmassen	1 Million Lichtjahre	vielfältige Sterntypen
Helmi-Strom 1999	ehemalige Zwerggalaxie	10 bis 100 Millionen Sonnenmassen	mehrfach um die Scheibe der Milchstraße gewickelt	alte Sterne
Palomar-5-Strom 2001	Kugelsternhaufen Palomar 5	5000 Sonnenmassen	30 000 Lichtjahre	alte Sterne
Monoceros-Ring 2002	Canis-Major-Zwerggalaxie	100 Millionen Sonnenmassen	200 000 Lichtjahre	Sterne mittleren Alters
Anticenter-Strom 2006	ehemalige Zwerggalaxie	unbekannt	30 000 Lichtjahre	alte Sterne
NGC-5466-Strom 2006	Kugelsternhaufen NGC 5466	10 000 Sonnenmassen	60 000 Lichtjahre	sehr alte Sterne
Waisenstrom 2006	Ursa-Major-II-Zwerggalaxie	100 000 Sonnenmassen	20 000 Lichtjahre	alte Sterne

Zehntausend aus derselben Gaswolke hervorgehen. Diese wiederum vererbt ihren Sprösslingen ein jeweils einzigartiges Gemisch chemischer Elemente und Isotope. Kim Venn von der University of Victoria in British Columbia etwa wies deutliche Unterschiede zwischen den Fingerabdrücken von Sternen aus Zwerggalaxien und jenen von typischen Vertretern der Milchstraße nach.

Wo sind die Geschwister unserer Sonne?

Weitaus schwieriger ist indessen die Suche nach dem Geburtsort einzelner Sterne. Gayandhi De Silva von der Europäischen Südsternwarte nahm kürzlich eine detaillierte chemische Analyse des Hyaden-Sternhaufens vor und zeigte, dass die Verteilung chemischer Elemente in seinen Sonnen nahezu identisch ist, was natürlich auf einen gemeinsamen Ursprung hindeutet. Eines Tages werden sich auf diese Weise vielleicht sogar die Geschwister ausmachen lassen, mit denen unsere Sonne einst aus derselben Gaswolke entstand.

Unterdessen werden die Messvorhaben immer größer dimensioniert. Rave, das Radial Velocity Experiment am Anglo-Australian Observatory, und Segue, die Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration am Sloan Telescope in New Mexico, ermittelten die Geschwindigkeiten und chemischen Zusammensetzungen von rund 100 000 nahen Sternen.

Noch mehr vor haben der Satellit Gaia der Europäischen Weltraumorganisation (Esa) und die amerikanische Space Interferometry Mission (Sim). Gaia wird von 2011 bis 2020 die dreidimensionale Struktur der Milchstraße kartieren, indem er Positionen und Geschwindigkeiten von einer Milliarde Sterne vermisst – fast ein Prozent aller Sterne der Galaxis! Einige Millionen davon sollen zudem auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht werden. Ebenfalls ab 2011 soll Sim die Positionen ausgewählter schwacher Sterne vermessen und so Informationen über sehr dünne Sternströme liefern.

Somit ist klar: Die Kuriosität, als die der Sternstrom der Sagittarius-Zwerggalaxie einst angesehen wurde, ist längst keine mehr. Schnell ist aus ihm das Vorzeigeobjekt schlechthin für Verschmelzungen und Akkretionen und damit für die wohl wichtigsten treibenden Kräfte in der Geschichte unserer Milchstraße geworden. ◁

Seit 1997 arbeiten **Rodrigo Ibata** (oben) und **Brad Gibson** gemeinsam daran, aus Beobachtungen der Sagittarius-Zwerggalaxie Erkenntnisse über die Dunkle Materie zu sammeln. Ibata ist vor allem Beobachter, Gibson steuert die Theorie bei. Ibata entdeckte auch die Canis-Major-Zwerggalaxie und arbeitet für das Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) am Observatoire Astronomique de Strasbourg. Gibson, Theoretischer Astrophysiker an der University of Central Lancashire in England, zählt zu den Pionieren der Computersimulation von Prozessen der Galaxienbildung.

Galactic chemical evolution. Von Brad K. Gibson et al. in: Publications of the Astronomical Society of Australia, Bd. 20, Nr. 4, S. 401, 2003

Uncovering cold dark matter halo substructure with tidal streams. Von R. A. Ibata et al. in: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 33, Nr. 4, S. 905, Juni 2002

The ghost of Sagittarius and lumps in the halo of the Milky Way. Von Heidi Jo Newberg et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 569, Nr. 1, S. 245, 1. April 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter: www.spektrum.de/artikel/896269.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Nur sphärische Halos produzieren »Gabeln«

Noch immer ist die Form des Halos umstritten, der die Milchstraßenscheibe wie eine Atmosphäre umhüllt und aus Kugelsternhaufen, alten Sternen und vor allem Dunkler Materie besteht. Gleicht er eher einer Kugel, einer Zigarre oder einem Diskus? Ein auffälliger Sternstrom lieferte Michael Fellhauer die Antwort.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zu Gast im Verlag: Michael Fellhauer, Astronom an der Cambridge University (rechts, mit Chefredakteur Reinhard Breuer). Der deutsche Experte für Computersimulationen forscht über die Entstehung von Galaxien.

Michael Fellhauer, Experte für Computersimulationen am Institute of Astronomy (IoA) der britischen University of Cambridge, hat die ungewöhnliche »Bifurkation« des Sagittarius-Sternstroms modelliert und kommt zu einem überraschenden Ergebnis.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Fellhauer, spaltet sich der Sagittarius-Sternstrom tatsächlich auf?

Michael Fellhauer: Nein, das ist keineswegs der Fall. Den Beobachtern erschien das zunächst allerdings so und der Begriff der Bifurkation ist an dem Phänomen hängen geblieben. Tatsächlich sehen wir an fast demselben Ort einen Ausschnitt sowohl des vorauseilenden als auch des nachgeschleppten Gezeitenarms der Zwerggalaxie. Jeder der Arme reicht zweimal um die Milchstraße herum. Der Ort der scheinbaren Gabelung ist dort, wo Sterne des einen Arms gegenüber der Zwerggalaxie eine halbe Umdrehung Vorsprung haben, während jene des anderen Arms eineinhalb Umdrehungen im Hintertreffen liegen.

Spektrum: Welche Schlüsse erlaubt Ihnen Ihre Entdeckung?

Fellhauer: Die Arme zeichnen je zwei volle Orbits nach, sodass sie viel über das Gravitationspotenzial der Milchstraße beziehungsweise ihres Halos verraten. Auffällig ist, dass die Orbitalebene pro Umlauf nur wenig kippt, was auf ein fast kugelförmiges Potenzial schließen lässt. Größere asphärische Beiträge würden zu einem stärkeren Kippen führen. Die galaktische Scheibe, die natürlich überhaupt nicht sphärisch ist, ist dabei kaum relevant, weil ihre Masse durch die fast zehnfach größere Masse der Dunklen Materie im Halo weit übertroffen wird. Einer Zigarre oder einem Diskus gleicht der Halo übrigens in keinem Fall: Selbst Formen, die unter Fachleuten als stark prolat beziehungsweise oblat gelten, lassen sich näherungsweise immer noch als Kugel betrachten.

Spektrum: Sie konnten die Bifurkation von Sagittarius als Erster in Simulationen nachbilden. Was fanden Sie heraus?

Fellhauer: Die Aufspaltung war ausschließlich dann zu sehen, wenn ich einen sphärischen Halo angenommen hatte. In diesen Fällen war sie sogar immer da und zwar völlig unabhängig davon, von welcher der gängigen Annahmen über die Massenverteilung in der Milchstraßenscheibe und im Halo ich jeweils ausgegangen war – sie hängt also nur von der Form des Halos ab.

Spektrum: Manche Ihrer Kollegen glauben nicht an einen kugelförmigen Halo. Konnten Sie sie schon überzeugen?

Fellhauer: Die Diskussion darüber beginnt bei jedem Vortrag von Neuem. Das häufigste Gegenargument lautet, dass meine Simulation die Sagittarius-Galaxie nicht genau genug reproduziert. Das ist zwar richtig – das geht bislang allen so, die sich darum bemühen –, aber nun ist doch eine viel stärkere Aussage möglich: Bei jedem Sternstrom, der sich wie Sagittarius auf einer fast senkrecht zur Milchstraßenscheibe verlaufenden Bahn befindet, kommt es im Fall eines sphärischen Halos zwangsläufig zu einer Bifurkation – und die Beobachtungen des Sagittarius-Stroms liefern den Beweis dafür. Seine Aufspaltung engt das Spektrum an möglichen Haloformen stärker ein als alle Untersuchungen zuvor.

Spektrum: Derzeit wächst die Zahl von Objekten, die weitere Aussagen über die Form des Halos erlauben. Das IoA-Team um Wyn Evans, dem neben Ihnen etwa auch Vasily Belokurov und Daniel B. Zucker angehören, entdeckte jüngst weitere Zwerggalaxien, die Zahl bekannter Objekte hat sich damit binnen zwei Jahren fast verdoppelt. Auch neue Sternströme fanden Sie. Woher die plötzliche Fülle?

Fellhauer: Die Funde basieren auf Daten des in New Mexico durchgeführten Sloan Digital Sky Survey, der auch sehr schwache Objekte und mittels Farbfiltern zudem den Anteil einzelner Farben im Sternlicht erfasst. Sortiert man die Sterne nach einem Farbindex – der ergibt sich beispielsweise aus der Helligkeit im grünen Bereich abzüglich jener im roten –, kann man ferne Sterne im Halo leicht identifizieren und die für uns uninteressanten nahen Exemplare, die über achtzig Prozent des Katalogbestands ausmachen, quasi ausradieren. In entsprechenden Diagrammen, in denen wir die Positionen der verbliebenen Halo-Sterne eintragen, sind große Satellitengalaxien wie Canes Venatici und der Bootes-Zwerg dann bereits mit bloßem Auge zu erkennen. Hilft außerdem ein Computerprogramm, das dichtere Populationen in der für das Auge sehr gleichmäßig erscheinenden Verteilung erkennt, findet man sehr schnell neue Objekte. ◁

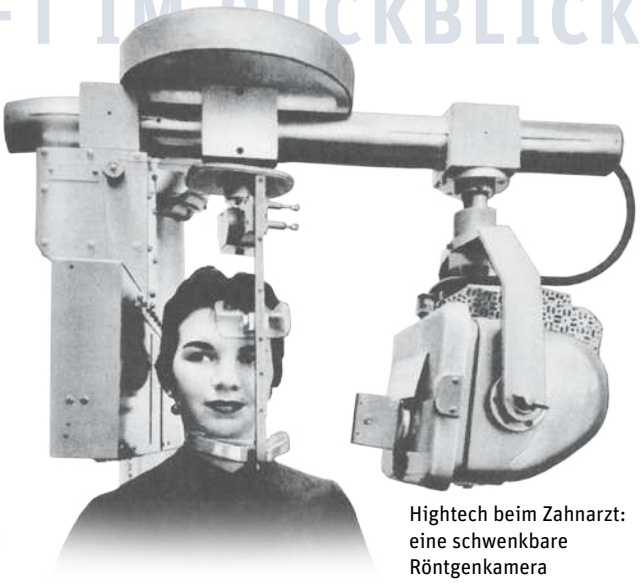
Die Fragen stellte **Thilo Körkel**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

1957

Chemotherapie des Krebses prophezeit

»Normale Zellen wie Krebszellen enthalten die gleichen Enzyme, jedoch weicht deren Konzentration in Krebszellen von der in gesunden Zellen vielfach ab … Es müßte möglich sein, auf dem Wege einer chemischen Einwirkung auf die Enzyme in das Krebsgeschehen einzugreifen … Daniel M. Shapiro ist der Ansicht, daß die Chemotherapie des Krebses noch im Laufe des Lebens der heutigen Generation Wirklichkeit werden wird, jedoch werde sie immer nur bei kleineren Geschwulsten Erfolg versprechen … Es muß abgewartet werden, ob sich diese Theorie bestätigen wird.« *Chemiker-Zeitung, 81. Jg., Nr. 17, S. 572, September 1957*



Hightech beim Zahnarzt: eine schwenkbare Röntgenkamera

Neues Element Nobelium

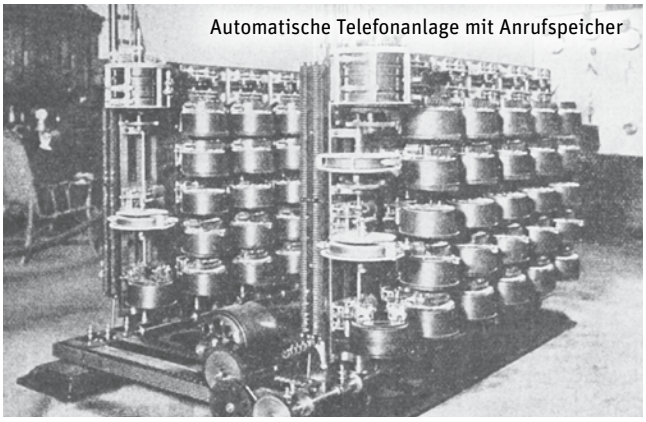
»Ein neues Element mit der Ordnungszahl 102 haben englische, schwedische und amerikanische Wissenschaftler in gemeinsamer Arbeit entdeckt … Das Element ist das zehnte, das seit 1940 gefunden wurde. Als Name für das neue Element will man der internationalen Chemikervereinigung die Bezeichnung Nobelium (nach Alfred Nobel) vorschlagen … Das Element sendet eine starke radioaktive Strahlung aus – seine Halbwertzeit beträgt ungefähr zehn Minuten.« *Universitas, 12. Jahrgang, Heft 9, S. 995, September 1957*

Rundum-Röntgen der Zähne

»Ein ›Zahnpanorama‹ im wahrsten Sinne des Wortes kann man mit einer neuen amerikanischen Röntgenkamera herstellen. Die an einem Schwenkarm befestigte Strahlenquelle bewegt sich kreisförmig um den Kopf des Patienten und hält in einem einzigen Schwenk alle Zähne in Einzelbildern fest. Ein automatischer Filmtransport in der Kassette, die am anderen Ende des Schwenkarmes ebenfalls drehbar befestigt ist, sorgt für den synchronen Ablauf des belichteten Filmmaterials.« *Hobby, 5. Jg., Nr. 9, S. 61, September 1957*

Intelligentes Leben auf dem Mars

»In New-York sind telegraphische Meldungen von Professor Lowell von dem Observatorium in Flagstaff, Arizona, eingetroffen, daß die von ihm nach Südamerika entsandte Expedition Photographien vom Mars erhalten habe, die die Kanäle und Oasen auf dem Mars mit einer über alle Erwartung großen Deutlichkeit aufzeigen. Die Photographien wurden in den Anden in einer Höhe von 17,500 Fuß aufgenommen … Die Geradheit und die systematische Art der Kanäle … führen nach Lowell unbedingt zu dem Schluß, daß sie durch planvolle Arbeit entstehen und die titanischen Werke einer intelligenten kraftvollen Bevölkerung darstellen, die den Kampf gegen die harten Lebensbedingungen eines ersterbenden Planeten führen.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 164, S. 328, September 1907*



Automatische Telefonanlage mit Anrufspeicher

Gletscherschmelze als Klimaindiz?

1907

»Fast überall auf der Erde ist gegenwärtig ein Zurückweichen der Gletschergrenzen beobachtet worden … Da nun die Vergletscherung zum grössten Teile von den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen abhängt, so ist der Rückgang ein wichtiger Anhaltspunkt für die Beurteilung der klimatischen Erscheinungen. Die Klimaperioden wiederholen sich nämlich in 35jährigen Zeitabschnitten, wie an dem … Zurückweichen der Gletschergrenzen … übereinstimmend zu erkennen ist. Zurzeit befinden wir uns sonach auf der ganzen Erde in einer Trockenperiode.« Die *Umschau, 11. Jg., Heft 40, S. 795/6, September 1907*

Ersatz für das Fräulein vom Amt

»Wer hätte nicht schon den Wunsch gehabt, mit dem Telephonamte nichts mehr zu tun zu haben, wenn er nach vergeblichen Versuchen eine Verbindung zu bekommen, schliesslich resigniert den Hörer wieder an den Haken hängt? … Schon längst sucht man deshalb das Amt vollkommen zu umgehen … Ein solches System stellt die von den Brüdern Lorimer erfundene automatische Telefonanlage dar. Die Anlage ist für ein Telephonamt bestimmt, das zweihundert Abonnenten umfasst … Sie stellt nicht nur die Verbindung her, sondern speichert sogar die Anrufe, wenn mehrere gleichzeitig erfolgen, auf und stellt dann die Vebindung der Reihe nach her, ohne dass man aufs neue anzurufen braucht.« *Deutsche Export-Revue, Nr. 12, S. 550/1, September 1907*

IHR WUNSCHARTIKEL: 1. Platz der vierten Runde
spektrum.de/wunschartikel

Kronen

schwarzer Stier des Hauses von Clarence

Rosen

königliche Symbole Eduards III.: Falke, Fußfessel, Rose und das Kreuz von St. Georg

Im Dickicht der Stammbäume

Modelle zur Vererbung kultureller und familiärer Merkmale enthüllen, wie eng wir Menschen miteinander verwandt sind. Herkömmliche Ansichten über Abstammungslinien erweisen sich als falsch.

Von Susanna C. Manrubia, Bernard Derrida und Damián H. Zanette

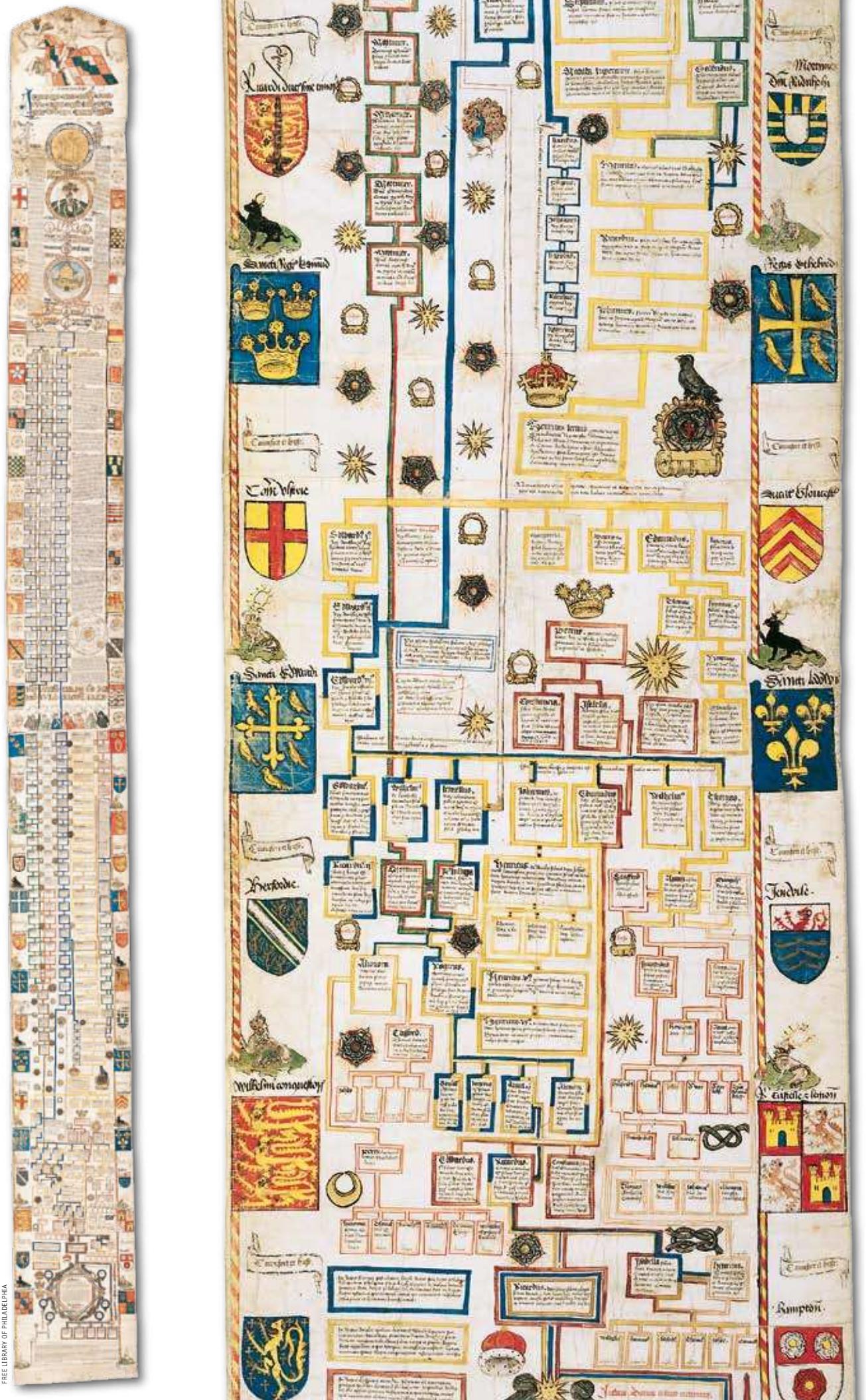
Der Earl von Warwick behauptet in Shakespeares Königsdrama Heinrich VI., Teil 2: »Das Klarste kann nicht klarer sein als dies! Heinrich besitzt den Thron von John von Gaunt, dem vierten Sohn; York heischt ihn von dem dritten! Bis Lionels Geschlecht erloschen, sollte seins [John von Gaunts] nicht regieren!«

In Wahrheit war zwei Generationen lang gar nichts klar. Im Lauf des englischen Rosenkriegs im 15. Jahrhundert schlachtete sich die Herrscherfamilie der Plantagenets fast komplett ab. Auslöser waren die rivalisierenden Thronansprüche der Häuser Clarence (Nachfahren Lionels, des dritten Sohns von Eduard III.), Lancaster (gegründet von John of Gaunt, dem vierten Sohn) und York (Haus des fünften Sohns Edmund). Der Nebel lichtete sich erst, nachdem Gaunts Nachfolger, Heinrich VII. von Tudor, den letzten König der Plantagenets, Richard III., in der Schlacht besiegt hatte. Er festigte seine Herrschaft, indem er innerhalb der eigenen Familie Elisabeth von York heiratete. Ihr Sohn, Heinrich VIII., stammte gleich auf vier unterschiedliche Arten von König Eduard III. (1312–1377) ab, wobei jede Linie eine wichtige Allianz und einen Wendepunkt der englischen Geschichte markierte.

Die Historie der englischen Königshäuser zeigt nicht nur, wie sehr das Schicksal ganzer Nationen von Abstammungsfragen abhängen kann, sondern auch, wie häufig in geschlossenen Populationen so genannte Koaleszenz vorkommt: das Verschmelzen der Zweige eines Familienstammbaums. Die Plantagenets sind ein typisches Beispiel. In einer Population von tausend Personen, die ihre Partner zufällig wählen, reichen normalerweise schon zehn Generationen aus, damit zwei beliebige Personen einen gemeinsamen Vorfahren haben. Nach 18 Generationen haben zwei Mitglieder einer solchen Population in der Regel sogar sämtliche Vorfahren gemeinsam. Daher ist es kein Wunder, dass zu Beginn des 20. Jahrhunderts jeder erbliche Monarch in Europa von Eduard III. abstammte.

In den vergangenen Jahrzehnten hat uns die Genforschung gezeigt, wie überraschend eng alle Menschen miteinander verwandt sind. Die Untersuchung der mitochondrialen DNA, kurz mt- ▷

Das prachtvolle Manuskript von 1461 zeigt die Komplexität eines königlichen Stammbaums. Die gut sechs Meter lange Pergamentrolle (links ganz abgebildet) führt die Linie von König Eduard IV. von England bis zu Noah zurück. Der vergrößerte Ausschnitt erstreckt sich von Eduard III. zu Richard, Graf von York (Ricardus, unten Mitte). Der mehrfarbige Rand von Richards Kasten deutet seine Verbindungen zu anderen Herrscherhäusern Europas an; diese Gemeinsamkeit von Vorfahren heißt Koaleszenz. Hingegen weisen die einfachen gelben Ränder der Könige Heinrich IV., V. und VI. auf wenige königliche Bindungen und entsprechend geringeren Thronanspruch hin.



FREE LIBRARY OF PHILADELPHIA

▷ DNA, die – außer bei Mutationen – unverändert über die Mütter weitergegeben wird, sowie die Analyse bestimmter Gene auf dem vom Vater auf den Sohn vererbten Y-Chromosom ergaben: Die »mitochondriale Eva« und der »Y-Chromosom-Adam« lebten vor erstaunlich kurzer Zeit. Die in jeder menschlichen Zelle vorhandenen Mitochondrien sind das weltweite Erbe einer einzigen Frau. 1987 errechneten Rebecca Cann, Mark Stoneking und Allan Wilson an der Universität von Kalifornien in Berkeley, dass diese Frau vor 140 000 bis 290 000 Jahren gelebt haben muss.

Solche Analysen erzählen aber nur einen Teil der Geschichte, da sie auf »monoparentaler Vererbung« – durch einen Elternteil – beruhen. Den größten Teil unseres Genoms erben wir »biparental« von Vater und Mutter, und deren Gene werden durch Crossing-over und Rekombination der DNA neu gemischt. Unsere rekombinierte DNA enthält eine viel ausführlichere Geschichte unserer Vergangenheit; wir müssen nur lernen, sie zu lesen. Könnten wir weit genug in die Vergangenheit zurückblicken, würde jeder von uns einen ebenso verschlungenen Stammbaum vorfinden wie Heinrich VIII. – mit vielen Zweigen, die durch Koaleszenz miteinander verschmolzen sind.

Die mitochondriale DNA ist zwar ein mächtiges Werkzeug, da sie dieses Gestrüpp durchschneidet und einen einzigen Zweig hervorhebt, doch aus demselben Grund unterschlägt sie die Komplexität unserer Vergangenheit. Um die Geschichte der menschlichen Ahnenreihe ganz zu verstehen, müssen wir mathematische Modelle und Computersimulationen für die Entwicklung von Genen und Abstammungslinien über hunderte Generationen hinweg verwenden – denn so weit reichen Ahnentafeln nicht zurück. Diese biparentalen Modelle zeigen, dass die monoparentalen (gestützt auf die mitochondriale DNA) tatsächlich unterschätzen, wie schnell menschliche Populationen hinsichtlich ihrer Abstammung homogen werden.

Der erste ernsthafte Versuch, ein genealogisches Problem mathematisch zu lösen, geht auf einen Streit zurück, an dem einer der berühmtesten britischen Wissenschaftler der Viktorianischen Ära beteiligt war: Sir Francis Galton, ein Cousin Charles Darwins, hatte 1869 ein Buch mit dem Titel »Hereditary Genius« (deutsch 1910: »Genie und Vererbung«) geschrieben, in dem er versuchte, den oft beobachteten Niedergang großer Familien zu erklären. »Es gibt viele Beispiele dafür, dass Nachnamen, die einst verbreitet waren, seltener wurden oder ganz verschwanden«, schrieb Galton einige

Warum sterben prominente Familien aus? Mindert ihr hoher Sozialstatus die Fruchtbarkeit – oder ist beim Verschwinden von Namen bloß der Zufall im Spiel?

Jahre später. »Die Tendenz ist überall zu beobachten, und zu ihrer Erklärung wurde vorschnell der Schluss gezogen, dass eine Zunahme an physischem Komfort und intellektueller Fähigkeit notwendigerweise mit einer Minderung der ›Fruchtbarkeit‹ einhergeht.« Galton selbst bot eine andere Erklärung an, die – für die damalige Zeit nicht verwunderlich – den Frauen die Schuld gab: Männer, deren Status sich kürzlich erhöht hat, versuchen ihre Position abzusichern, indem sie Erbinnen heiraten – per Definition Frauen aus Familien ohne Söhne. Solche Frauen, glaubte er, würden auch selbst mit geringerer Wahrscheinlichkeit Söhne gebären.

Doch ein Schweizer Botaniker namens Alphonse de Candolle wies mit Recht auf eine andere Möglichkeit hin: Das Verschwinden mancher Familiennamen könnte einfach Zufall sein. Solange Wissenschaftler die Wahrscheinlichkeit nicht kennen, mit der Nachnamen zufällig aussterben, können sie auch nicht sagen, ob die Auslöschung »berühmter« Nachnamen in irgendeiner Weise anormal ist.

1874 bat Galton einen Mathematiker, den Geistlichen Henry William Watson, diese Frage zu klären. Watsons Ansatz war genial, und um ein Haar hätte er eine Grundlage der im 20. Jahrhundert entwickelten Theorie der Verzweigungsprozesse entdeckt.

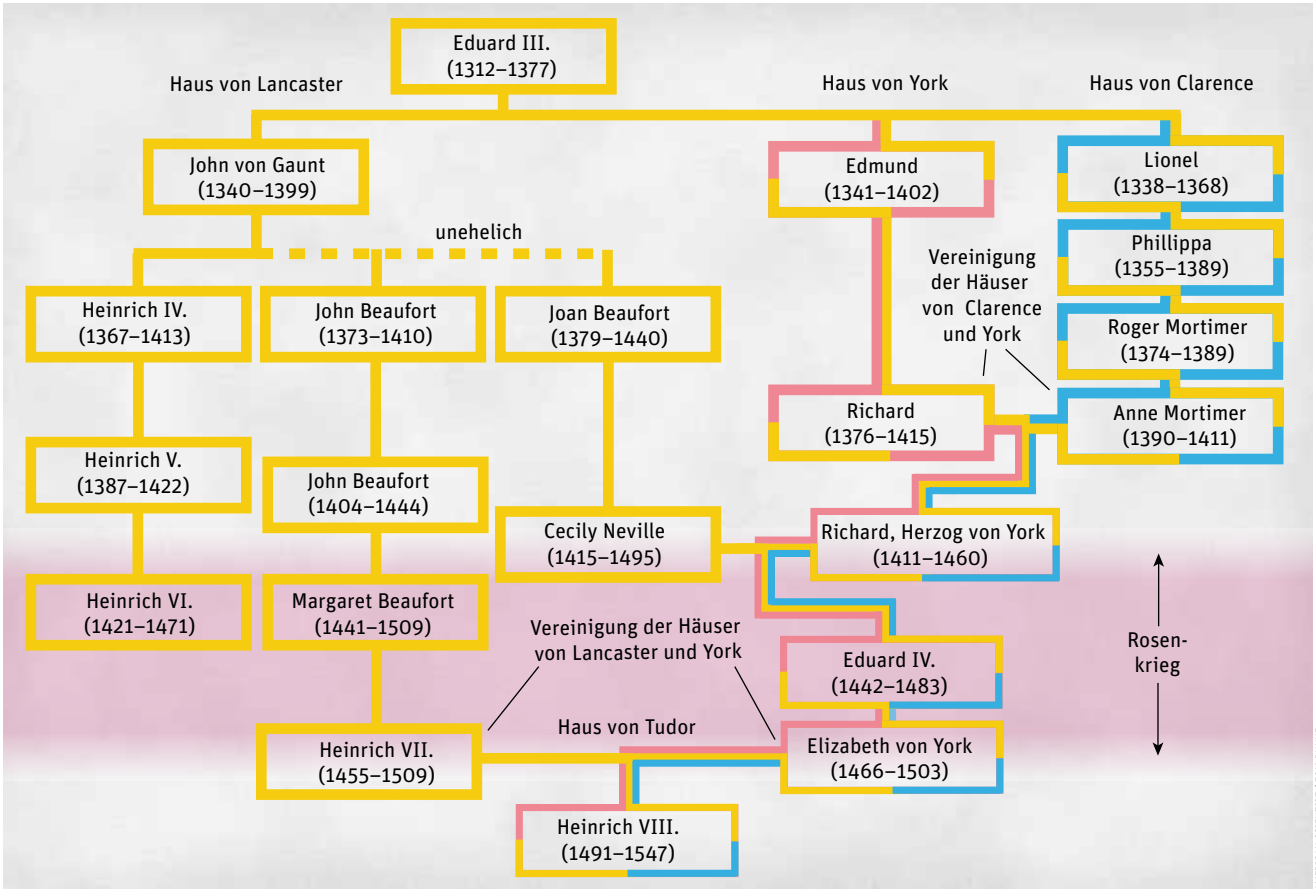
Um die Rolle des Zufalls zu ermitteln, nahm Watson an, alle Männer hätten gleiche angeborene Fruchtbarkeit. Somit hing die unterschiedliche Anzahl ihrer Nachkommen nur vom Zufall ab. Jeder Mann hatte mit Wahrscheinlichkeit p_0 keinen Sohn, mit Wahrscheinlichkeit p_1 einen Sohn, mit p_2 zwei Söhne und so fort. Wenn ein Mann ohne Sohn blieb, starb sein Name natürlich sofort aus. Daher war die Wahrscheinlichkeit, nach einer Generation auszusterben – nennen wir sie q_1 –, genauso groß wie p_0.

In den nachfolgenden Generationen werden die Verhältnisse jedoch komplizierter, weshalb Galton um Hilfe gebeten hatte. Zum Beispiel kann ein Mann einen Sohn haben (Wahrscheinlichkeit p_1), der selbst keinen Sohn hat (Wahrscheinlichkeit p_0); die Wahrscheinlichkeit, dass die Namenslinie auf diese Weise erlischt, wäre dann das Produkt der Wahrscheinlichkeiten: p_1p_0. Er könnte aber auch zwei Söhne bekommen (Wahrscheinlichkeit p_2), die beide keine Söhne haben (Wahrscheinlichkeit p_0^2). Die Wahrscheinlichkeit dafür wäre $p_2p_0^2$. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten für jeden dieser Fälle ergibt die Wahrscheinlichkeit q_2, mit der die Linie nach zwei Generationen ausstirbt:

$$q_2 = p_0 + p_1p_0 + p_2p_0^2 + p_3p_0^3 \ldots$$

In Kürze

- Die **Abstammungslinien** von Stammbäumen können durch Koaleszenz miteinander verschmelzen. Dadurch sind die Menschen stärker verwandt als vermutet.
- Die mitochondriale DNA, die nur über die **mütterliche Linie** vererbt wird, gibt Genforschern Aufschluss über Ursprung und Verwandtschaft menschlicher Populationen über Jahrtausende hinweg.
- Doch erst **mathematische Modelle** für die Vererbung der Gene von Vater und Mutter offenbaren das ganze Ausmaß menschlicher Verwandtschaftsbeziehungen.



Dieser stark vereinfachte Stammbaum des englischen Königs Heinrich VIII. zeigt vier Linien, die zu König Eduard III. zurückführen. Genealogische Koaleszenz tritt auf, wenn beide Eltern einer Person einen gemeinsamen Vorfahren haben. In der hier gezeigten Ahnenreihe gab es drei solcher Ehen, die mit politischer Absicht herbeigeführt wurden. Doch wie die Autoren zeigen, tritt Koaleszenz überraschend schnell in allen geschlossenen Populationen auf, selbst wenn die Partnerwahl ganz zufällig erfolgt.

Watsons brillante Erkenntnis war nun, dass die rechte Seite dieser Gleichung, die so genannte Erzeugungsfunktion, bereits die gesamte Information über die Wahrscheinlichkeit einer Auslöschung in späteren Generationen enthält. Um Auslöschungswahrscheinlichkeiten zu berechnen, muss man bloß die Erzeugungsfunktion wiederholt anwenden. Mathematisch definierte Watson die Erzeugungsfunktion f (x), indem er jedes p_0 mit Ausnahme des ersten durch die Variable x ersetzte:

$$f(x) = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 \ldots$$

Dann zeigte er, dass sich die Auslöschungswahrscheinlichkeit für jede Generation durch Iteration errechnen lässt. Das heißt, die Auslöschungswahrscheinlichkeit der vorherigen Generation wird in die Funktion eingesetzt:

$$q_1 = f(0),\ q_2 = f(q_1),\ q_3 = f(q_2),\ \ldots$$

Und wie groß wäre die Auslöschungswahrscheinlichkeit nach unbegrenzt vielen Generationen, q_∞? Das wäre einfach eine Iteration ihrer selbst:

$$f(q_\infty) = q_\infty$$

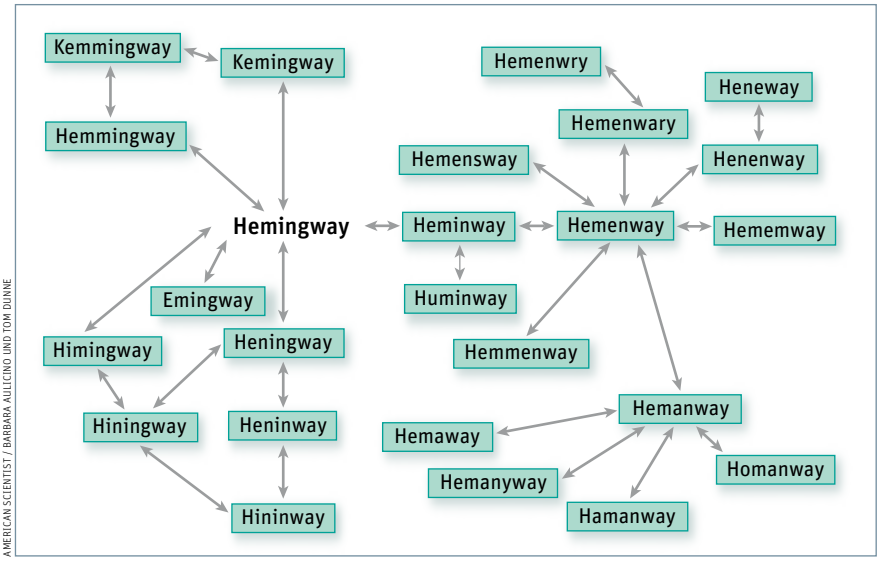
Diese Gleichung liefert die Wahrscheinlichkeit, dass jede Linie letzten Endes – nach einer, zehn oder beliebig vielen Generationen – ausstirbt.

Watsons grober Schnitzer

Als Watson schon fast eine Lösung hatte, machte er einen groben Schnitzer. Da er keine demografischen Daten besaß, aus denen die Wahrscheinlichkeit für keinen Sohn, einen Sohn, zwei Söhne und so weiter hervorging, riet er einfach: $f(x) = (3 + x)^5 / 4^5$. Die Annahme war gar nicht übel, doch dann unterlief ihm ein mathematischer Fehler: Er übersah eine Lösung für seine Gleichung. Er glaubte, die einzige Lösung sei $f(1) = 1$ und somit $q_\infty = 1$. Das würde bedeuten, dass jede Linie mit hundertprozentiger Sicherheit ausstirbt.

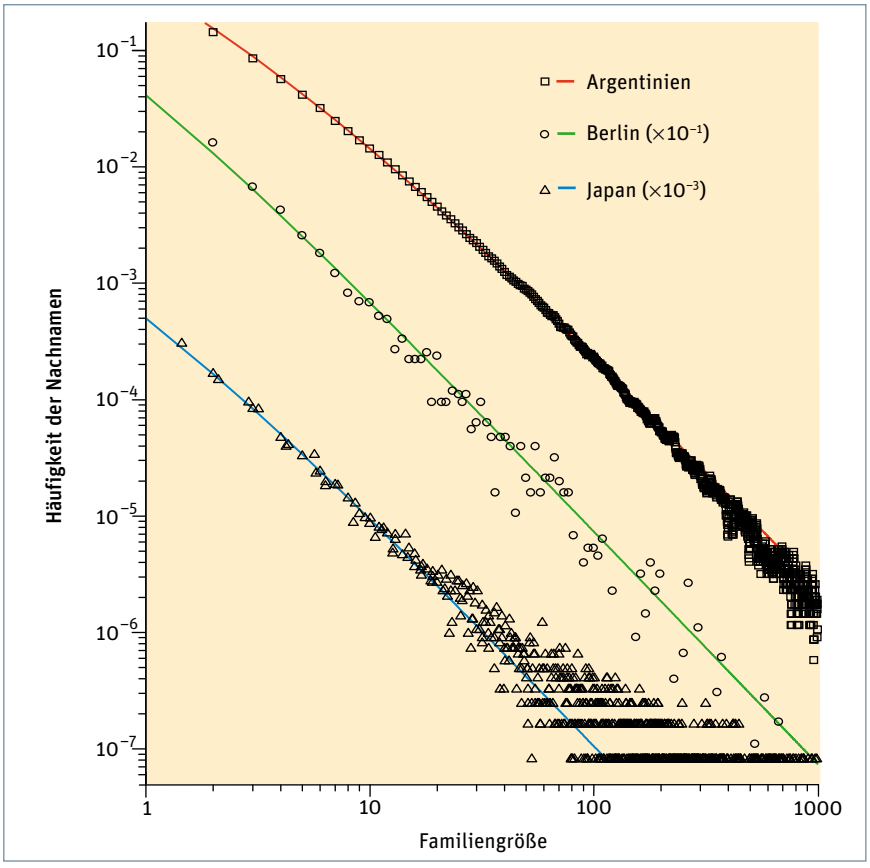
Wie deprimierend! »Alle Nachnamen haben daher die Tendenz, in unbegrenzter Zeit auszusterben«, schrieb Watson. »Dieses Resultat war eigentlich vorherzusehen, denn ein Nachname, wenn er erst einmal verloren ist, kann niemals wiederhergestellt werden, und mit jeder nachfolgenden Generation erhöht sich die Chance des Verlusts.«

Watsons Analyse stimmt für schrumpfende oder konstante Populationen. Doch für eine wachsende Population hat q_∞ eine zweite Lösung. Bei der von Watson verwendeten Erzeugungsfunktion wuchs die Population um knapp neun Prozent pro Generation, und die zweite Lösung lautet: $f(0{,}55) = 0{,}55$. Das heißt, jede Linie stirbt mit 55 Prozent Wahrscheinlichkeit aus und besteht mit 45 Prozent ewig weiter. Stark vereinfacht kann man sagen, dass eine Linie – zum Beispiel die der Meiers oder die der ▷



AMERICAN SCIENTIST / BARBARA AULICINO UND TOM DUNNE

Die Schreibweise englischer Nachnamen war historisch einem starken Wandel unterworfen. Das Diagramm zeigt eine kleine Auswahl von Mutationen des Namens Hemingway, wie sie in US-Volkszählungen des 19. Jahrhunderts auftauchen.



EMMA SKURNICK

Das Modell der Autoren liefert präzise Vorhersagen über die Anzahl von Nachnamen, die zu einer bestimmten Familiengröße gehören. Das Diagramm zeigt die im Modell berechnete Häufigkeit jeder Familiengröße (Linien) im Vergleich zu Telefonbuchdaten aus Argentinien (Quadrate), Berlin (Kreise) und Japan (Dreiecke). Die Daten für Argentinien und Berlin passen gut zum Modell, während die Japan-Daten deutlich abweichen. Die Autoren führen dies auf erst kürzlich eingeführte Nachnamen zurück.

▷ Schmidts – eine kritische Masse erreichen kann, die praktisch ihr Weiterleben garantiert. Doch da Watson das Problem scheinbar gelöst hatte, fiel sein Fehler fünfzig Jahre lang niemandem auf.

In den 1920er Jahren legte eine neue Generation von Biologen und Mathematikern die Grundlagen der Populationsgenetik – und stieß bald auf Watsons Fehler. In einer wachsenden Bevölkerung hat jede Linie eine von null verschiedene Chance, unbegrenzt weiterzuleben. 1939 verwendete Alfred Lotka Daten aus der US-Volkszählung von 1929, um p_0, p_1 und so weiter abzuschätzen, und errechnete daraus für q_∞ einen Wert von 0,819. Demnach betrug damals in den USA die Wahrscheinlichkeit für das unbegrenzte Überleben eines Nachnamens, der nur einen Stammvater hatte, rund 18 Prozent. Oder, pessimistisch betrachtet: Die Wahrscheinlichkeit für das letztendliche Aussterben lag bei 82 Prozent.

Nachnamen und Mitochondrien

Solche Aussagen bergen freilich eine Gefahr: Sie klingen wie absolute Wahrheiten. Man muss sich vergegenwärtigen, dass sie von speziellen mathematischen Annahmen abhängen, die nicht unbedingt mit der Wirklichkeit übereinstimmen. In Watsons Modell – unter Populationsgenetikern als Galton-Watson-Prozess bekannt – sind einige Annahmen recht fragwürdig. Haben wirklich alle Männer die gleiche angeborene Fruchtbarkeit? Vielleicht überträgt die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Familie bestimmte evolutionäre Vorteile; dann ist der Prozess nicht mehr »neutral«. Dies wird übrigens wahrscheinlicher, wenn man Galton-Watson-Prozesse auf biologische Merkmale anwendet statt auf Nachnamen. Ist die Fruchtbarkeit jedes Mannes wirklich unabhängig von der jedes anderen, und bleibt sie zeitlich konstant? Und was geschieht, wenn wir Mutationen von Nachnamen zulassen, ob durch Einwanderung oder veränderte Schreibweise?

In der Tat ist die Veränderlichkeit von Familiennamen stark kulturabhängig. In China wurden Nachnamen über Jahrtausende hinweg sorgsam gehütet. Eine Erhebung durch Kaiser Tang Taizong im Jahr 627 n. Chr. ergab insgesamt 593 verschiedene Namen. Im Jahr 960 listete das Buch »Nachnamen von hundert Familien« 438 Einträge auf. Heute tragen rund 40 Prozent der chinesischen Bevöl-

kerung einen der zehn häufigsten Namen, und 70 Prozent haben einen der 45 häufigsten. Vermutlich ist die Ursache für diese geringe Veränderlichkeit im chinesischen Schriftsystem zu suchen, das jeden Nachnamen durch ein einziges Zeichen wiedergibt.

Im Gegensatz dazu herrscht in Nordamerika die größte Namensvielfalt der Welt – Ausdruck der durch Immigration geprägten Geschichte der USA und Kanadas. Auch die extreme Veränderlichkeit englischer Schreibweisen hat die Namensvielfalt erhöht, wie der folgende Auszug einer Internetseite über die Hemingways zeigt (siehe Bild links oben):

> Mein variabelster Vorfahr, Fisher Hemingway, geboren 1819 oder 1820 in New York, ... erscheint als: Hemensway, Fisher in der Volkszählung von 1880; Hemingway, Fisher bei der Heirat mit Catharine Chambers 1858; Hemenway, Fisher im Adressbuch von Cleveland für 1845/46; Henenway, Fisher in der Volkszählung von 1840; Hemmingway, Fisher bei der Heirat mit Elizabeth Elliott 1839 ... Meine aktuelle Liste von Hemingway-Varianten füllt viele Seiten, und ich vermute, dass ich viele übersehen habe.

Wir haben die Verteilung von Nachnamen mit einem einfachen Modell untersucht, das zu jedem Zeitpunkt eine kleine Wahrscheinlichkeit für Mutationen zulässt. Außerdem enthält es eine flexible Sterberate, die größer oder kleiner als die Geburtenrate angesetzt werden kann, aber auch ebenso groß. Wie im Galton-Watson-Modell finden wir drastische Unterschiede zwischen wachsenden Populationen und statischen, bei denen Geburten- und Sterberate gleich sind.

In einer wachsenden Bevölkerung nimmt die Namensvielfalt mit der Zeit stets zu. Nach genügend langer Zeit wird die Anzahl der Namen n (y), die zu exakt y Personen gehören, proportional zu $1/y^2$ für genügend hohe y-Werte, das heißt für große Familien. Daher sollte es beispielsweise hundertmal so viele Nachnamen geben, die nur 20 Personen gehören, wie Namen, die 200 Personen gemeinsam sind.

In einer statischen Bevölkerung hingegen wird die Mutationsrate sehr wichtig. Ist sie zu niedrig, nimmt die Vielfalt sehr wahrscheinlich so lange ab, bis nur noch ein einziger Nachname vorherrscht. Ist die Mutationsrate hoch, nähert sich die Häufigkeitsfunktion n (y) einem stabilen Zustand, der allerdings viel stärker kleine Familien bevorzugt als in einer wachsenden Population.

Wohlgemerkt, diese stabilen Zustandsverteilungen gelten erst nach vielen Generationen. Das bedeutet umgekehrt: Abweichungen vom erwarteten stabilen Zustand können jüngste historische Ereignisse widerspiegeln. Zum Beispiel tauchten moderne japanische Nachnamen erst vor 120 Jahren auf. Darum sollte die Verteilung der Familiengrößen – insbesondere für große Familien – von den Anfangsbedingungen vor einem Jahrhundert geprägt sein.

Ein Vergleich mit realen Daten aus drei Quellen – dem Telefonbuch für ▷

FÜR MENSCHEN, DIE ES
GENAUER
WISSEN WOLLEN

Wissenschaft ist spannender, als es ein Blick in die Tageszeitung vermuten lässt. Entdecken Sie mit spektrumdirekt, der Wissenschaftszeitung im Internet, täglich neu die Faszination der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/heute

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

▷ ganz Argentinien von 1996, den »A«-Einträgen des Berliner Telefonbuchs von 1996 und der Liste aller Nachnamen aus fünf japanischen Städten von 2000 – scheint diese Thesen zu bestätigen. In dieser Untersuchung definierten wir »Familie« als alle Menschen mit demselben Nachnamen.

Die argentinischen Daten decken sich – bis auf ein leichtes Defizit sehr großer Familien – hervorragend mit der Kurve n (y) für den stabilen Zustand. Dies passt zu Argentiniens demografischer Entwicklung: Eine überwiegend gesamteuropäische Bevölkerung wurde durch Einwanderer gegen Ende des 19. Jahrhunderts und nach dem Zweiten Weltkrieg ein wenig gestört. Die Berlin-Daten streuen stärker, weil der Datensatz kleiner ist, scheinen aber der stabilen Zustandsverteilung zu folgen. Doch die Japan-Daten weichen drastisch davon ab, mit einem deutlichen Überschuss großer Familien. Könnten wir ein, zwei Jahrhunderte zurückgehen, fänden wir vermutlich eine Verteilung, die sich enger an die Gerade im Diagramm auf S. 68 unten schmiegt. Dies würde aber nicht zutreffen, falls es in Japan eine längere Phase des Nullwachstums gegeben hätte.

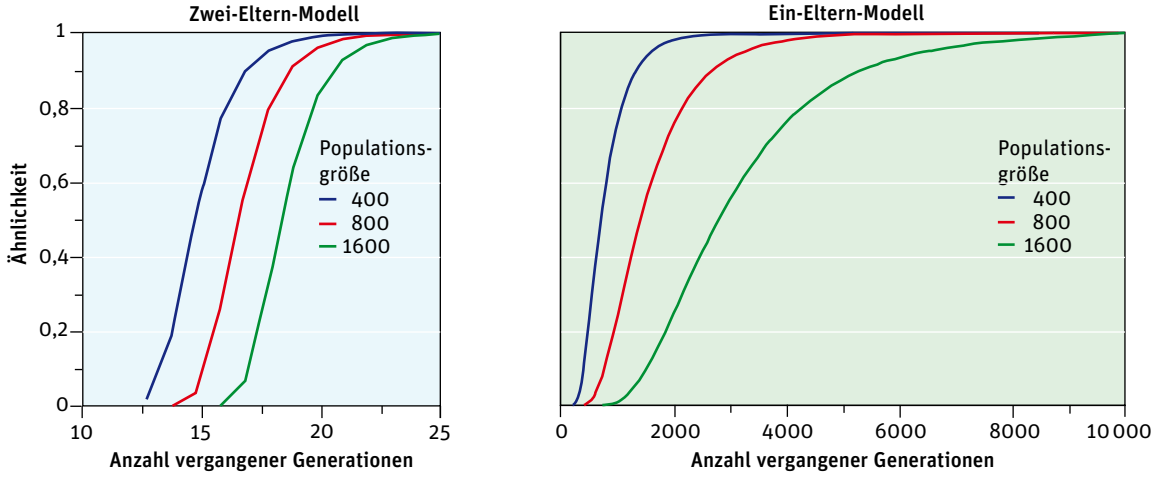
Moderne Wissenschaftler kümmern sich vielleicht weniger als zu viktorianischen Zeiten um Nachnamen oder das Ende großer Familien. Dafür interessieren sie sich umso mehr für die mitochondriale DNA, die wie der Familienname monoparental vererbt wird. Die mtDNA der Mutter wird – abgesehen von seltenen Mutationen – intakt an all ihre Kinder vererbt; doch nur ihre Töchter können diese DNA an die nächste Generation weitergeben. Die einfachste Zähleinheit eines DNA-Doppelstrangs ist das Basenpaar, das aus je einem Nukleotid pro Strang besteht. In der mtDNA gibt es einen speziellen Abschnitt, die so genannte Kontrollregion. Sie ist rund 500 Basenpaare lang und verhält sich offenbar evolutionsbiologisch neutral: Das Segment scheint keine spezifische Funktion zu haben, und seine Mutationen bieten keinen Überlebensvorteil. Daher bildet die langsame, zufällige genetische Drift der mtDNA eine hervorragende genetische Uhr, die anzeigt, ob – und vor wie langer Zeit – zwei Menschen oder zwei Menschengruppen eine gemeinsame Vorfahrin hatten. Die Entdeckung dieser Uhr klärte einige wichtige historische Streitpunkte, sowohl für die jüngste Vergangenheit als auch für die graue Vorzeit.

Beispielsweise bewies die mtDNA einer Frau, die für Prinzessin Anastasia, die Tochter des letzten russischen Zaren, gehalten wurde, dass sie mit anderen Überlebenden der Romanow-Dynastie nicht verwandt war. Die Mitochondrien von Bewohnern der Pazifik-Inseln weisen Mutationen auf, die unter Asiaten verbreitet sind; das beweist, dass die Pazifik-Insulaner aus Asien kamen und nicht, wie manche Historiker glaubten, vom amerikanischen Kontinent. Und die Analyse der mtDNA aus dem Oberarm eines 50 000 Jahre alten Neandertaler-

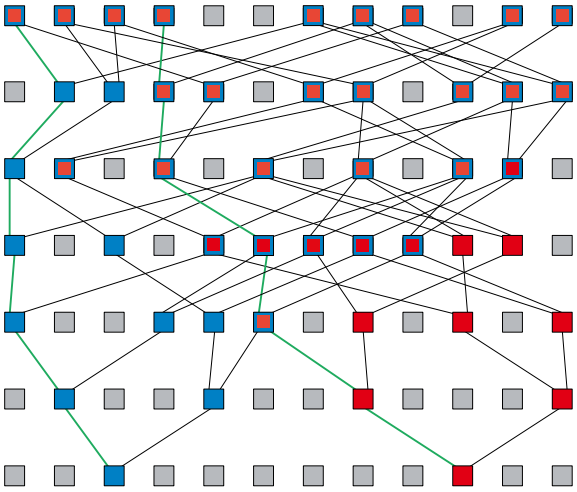
Eine Analyse ihrer mitochondrialen DNA entlarvte die vermeintliche Zarentochter Anastasia

Bald sind alle verwandt

In geschlossenen Populationen mit zufälliger Partnerwahl entsteht erstaunlich schnell vollständige Koaleszenz. Hier werden zwei unterschiedliche Maße für genealogische Ähnlichkeit verwendet. Im Zwei-Eltern-Modell (links) bedeutet Ähnlichkeit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Individuum alle Personen der n-ten Vorläufergeneration zu Vorfahren hat, die gegenwärtig Nachkommen haben. Die Geschwindigkeit des Übergangs von völliger Nichtverwandtschaft zu kompletter Verwandtschaft hängt nicht von der Populationsgröße ab, wohl aber der Zeitpunkt des Übergangs: Größere Populationen benötigen mehr Generationen. Im Ein-Eltern-Modell bezeichnet Ähnlichkeit die Wahrscheinlichkeit, dass alle Personen der gegenwärtigen Population dieselbe mitochondriale DNA von einer vor n Generationen lebenden Person geerbt haben. Populationen von einigen hundert Personen brauchen mehr als tausend Generationen, bis alle mit großer Wahrscheinlichkeit dieselbe mitochondriale Ahnin haben. In diesem Fall hängt die Geschwindigkeit des Übergangs von der Populationsgröße ab; er verläuft bei großer Population langsamer.



EMMA SKURNICK



EMMA SKURNICK

Die gemeinsame Grossmutter

Koaleszenz entsteht im Zwei-Eltern-Modell viel schneller als in einem Ein-Eltern-Modell. Jede Zeile dieses Diagramms repräsentiert eine Generation in einer konstanten Population von zwölf Personen. Aus der gegenwärtigen Generation (unterste Zeile) werden zwei Personen ausgewählt und ihre Vorfahren sechs Generationen weit zurückverfolgt. Der späteste gemeinsame Vorfahr (rot-blaues Quadrat) tritt in der zweiten Generation auf. In früheren Generationen nimmt die Anzahl gemeinsamer Ahnen immer weiter zu, bis sich in der sechsten Generation die roten und blauen Ahnenreihen komplett überlappen. Hingegen wird bei Vererbungsformen, an denen nur ein Elternteil beteiligt ist – zum Beispiel mitochondriale DNA –, nach sechs Generationen oft noch kein gemeinsamer Vorfahr entdeckt (grüne Linien).

Skeletts ergab, dass sich die Neandertaler offenbar vor 500 000 Jahren von der zum heutigen Menschen führenden Entwicklungslinie abgespaltet haben und darum keine mtDNA zu unserem Erbteil beitragen. Im Allgemeinen vermag die mtDNA genau wie ein Familienname demografische Ereignisse in der Vergangenheit einer Population aufzuspüren – etwa Migrationen, Bevölkerungsengpässe oder Expansionen.

Die mitochondriale DNA hat uns wichtige Erkenntnisse über die Geschichte der Menschheit geliefert. Doch sie erzählt nicht alles, denn wir wissen, dass im Prinzip jeder Vorfahr in unserem Stammbaum zu unseren Genen beiträgt. Die »mitochondriale Eva« und der »Y-Chromosom-Adam« müssen weder gleichzeitig noch in derselben Region gelebt haben, und sie leisteten nicht unbedingt den wichtigsten Beitrag zu unserer genetischen Prägung. Tatsache ist: Wenn wir zu einer bestimmten Zeit einen gemeinsamen Vorfahren hatten, dann hatten wir fast sicher viele davon. Die mitochondriale Eva war nur zufällig die Mutter der Mutter der Mutter – und so weiter viele tausend Mal – unserer Mutter. Die Mitochondrien-Analyse kann uns nicht verraten, wer der Vater der Mutter des Vaters der Mutter – auch dies viele tausend Mal – unseres Vaters war. Einige dieser nicht nachweisbaren Vorfahren könnten vor viel kürzerer Zeit gelebt haben als die mitochondriale Eva.

Außerdem leisten gemeinsame Vorfahren nicht notwendigerweise gleiche Beiträge zu unserem Genom. Zwar tragen unsere Eltern je 50 Prozent zu unserem genetischen Material bei, aber unsere Großeltern lieferten nicht unbedingt jeweils 25 Prozent. Wenn man weiter zurückgeht, könnten manche Vorfahren ihren genetischen Beitrag durch Stammbaum-Koaleszenz erhöht haben: Mehr Zweige, die zu ihnen führen, bedeuten mehr Möglichkeiten, ihre DNA an uns weiterzugeben.

Ein Elternteil oder zwei?

Zwei neuere Studien, eine von uns und die andere von Joseph Chang von der Yale-Universität, heben den Unterschied zwischen dem genetischen und dem genealogischen Ansatz der Koaleszenz hervor. Die mathematischen Abstammungsmodelle sind in beiden Studien sehr ähnlich, und wir konnten sie auf Populationen variierender Größe erweitern. Die Modelle schreiten von der Gegenwart zur Vergangenheit fort: Wir nehmen an, dass jedes Individuum zufällig zwei Eltern aus der vorhergehenden Generation auswählt.

Wie Chang einräumt, ist dieses einfache Modell nicht besonders realistisch, denn es ignoriert die Geschlechtsunterschiede und lässt unmögliche Stammbäume zu. Um dem zu begegnen, kann man jedes Individuum durch ein Paar ersetzen und erhält eine Population aus n monogamen Paaren. Die Zufallswahlen führen dann nicht zu Widersprüchen: Sowohl Ehemann als auch Ehefrau werden von einem Paar der vorigen Generation geboren. Das Modell stimmt gut mit Volkszählungsdaten zu Familiengrößen überein. Außerdem kann man es im Prinzip so umformulieren, dass es in Zeitrichtung vorwärtsschreitet; allerdings ist die Vorwärtsversion komplizierter.

Mit diesem Modell lassen sich viele Probleme untersuchen, zum Beispiel die Frage, die Galton und Watson interessierte: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass die eigene Namenslinie – nun definiert als sämtliche Nachkommen, nicht nur Söhne von Söhnen von Söhnen – ausstirbt? Wenn man per Zufall zwei Zeitgenossen auswählt, wie viele Generationen muss man dann zurückgehen, um einen gemeinsamen Vorfahren zu finden? Wie weit muss man zurückgehen, bis alle Vorfahren dieselben sind? Betrachten wir eine konstante Bevölkerung aus zwölf Personen (Bild oben).

Der erste gemeinsame Vorfahr von zwei Individuen ist eine Großmutter. Auf dem Weg zu noch früheren Generationen werden die gemeinsamen Vorfahren immer häufiger, und schon nach – oder besser vor – sechs Generationen haben die beiden Individuen alle Ahnen gemeinsam. Wohlgemerkt: Zu diesem Zeitpunkt haben sich die mitochondrialen Linien noch nicht vereinigt; ein Genetiker, der die mtDNA untersucht, würde kaum erkennen, wie eng die beiden heute lebenden Individuen miteinander verwandt sind.

Das Beispiel ist nicht ungewöhnlich. In einer konstanten Population mit n Individuen ist die Anzahl der Generationen bis zum ersten gemeinsamen Vorfahren ungefähr gleich dem Logarithmus von n zur Basis 2. Da der Logarithmus von 12 zur Basis 2 rund 3,6 ist, dürfen wir vor drei bis vier Generationen den ersten gemeinsamen Vorfahren erwarten. Chang zufolge ist die Generationenanzahl G, bis zu der zwei beliebige Individuen dieselben Vorfahren haben, 1,77 mal Logarith- ▷

▷ mus n zur Basis 2. Man könnte das die Koaleszenzzeit der Population nennen. Für 12 Personen erhält man 6,3 Generationen, was zum Bildbeispiel passt.

Wir gingen anders vor als Chang, indem wir verglichen, wie oft ein bestimmter Vorfahr in zwei verschiedenen Stammbäumen vorkommt. Wie wir herausfanden, sind rund log n Generationen nötig, bis die Anzahl der Wiederholungen jedes Vorfahren in allen Stammbäumen gleich groß wird. Dabei gibt es – unabhängig von der Populationsgröße – einen abrupten Übergang bei 14 Generationen, mit dem die Ähnlichkeit von 1 auf 99 Prozent springt.

Wir alle sind königlichen Geblüts

Außerdem fanden sowohl Chang als auch unser Team heraus, dass es nicht nur einen universellen gemeinsamen Vorfahren gibt, sondern eine universelle Ahnen-Population. Zur Koaleszenzzeit entsteht eine vollständige Dichotomie: Jedes Individuum ist entweder ein Vorfahr aller Personen in der gegenwärtigen Generation – oder niemandes Vorfahr. Bei konstanter Population sind rund 80 Prozent der Personen in der G-ten Generation universelle Vorfahren, und die übrigen 20 Prozent gehören zu aussterbenden Linien. In einer wachsenden Bevölkerung ist der Anteil universeller Vorfahren höher, und aussterbende Linien sind entsprechend seltener.

Ganz offensichtlich stellen diese Resultate herkömmliche Ansichten über Stammbäume und mitochondriale Evas auf den Kopf. Darum lohnt ein kritischer Blick auf unsere Modellannahmen. Chang hat sicher Recht, wenn er davor warnt, die Ergebnisse direkt auf die Weltbevölkerung anzuwenden. In Wirklichkeit ist die Auswahl der Eltern – oder im Vorwärtsmodell die Auswahl der Partner – natürlich nicht zufällig. Geografische, ethnische, religiöse und soziale Faktoren beeinflussen die Partnerwahl. Dennoch erfahren wir aus den Modellen etwas Wichtiges: In Subpopulationen, in denen zufällige Partnerwahl möglich ist, entsteht erstaunlich schnell – eher in Hunderten als in Hunderttausenden von Jahren – eine Menge gemeinsamer Vorfahren.

Hingegen dauert es viel länger, bis in einer Population genetische Homogenität entsteht. Zwar verdoppelt sich mit jeder Generation im Stammbaum die Anzahl der Ahnen, aber das gilt nicht für einzelne Gene; sie werden stets über einzelne Äste vererbt und folgen daher einem monoparentalen Modell. Man könnte eine genetische Koaleszenzzeit definieren als die Anzahl der Generationen, die nötig ist, um für jedes nicht rekombinierende Allel einen gemeinsamen Vorfahren zu finden. Das ist praktisch das Gleiche wie beim Problem der mitochondrialen DNA, wo jedes Individuum nur mit einem Elternteil verbunden ist. In einer bahnbrechenden Studie zeigte Sir John Frank Charles Kingman, derzeit an der Universität Cambridge tätig, dass die für diese Art von Koaleszenz erforderliche Anzahl von Generationen ebenso groß ist wie die Population selbst. Beispielsweise erreicht eine zufällig untereinander heiratende tausendköpfige Population in nur 18 Generationen genealogische Koaleszenz, braucht aber für genetische Koaleszenz tausend Generationen. Und selbst in diesem Fall können verschiedene Gene zu unterschiedlichen gemeinsamen Vorfahren führen. Darum spricht man besser von einer ganzen Ahnenpopulation statt von einer einzigen Eva.

Die Analyse der mitochondrialen DNA hat viele spektakuläre Erkenntnisse über die menschliche Evolution geliefert. Die mtDNA ist ein kleines, aber wesentliches Stück unseres Genoms. Sie gibt Aufschluss über Ursprung und Verwandtschaft menschlicher Populationen, weil sie – analog zu den männlich vererbten Familiennamen – nur über die mütterliche Linie weitergegeben wird. Doch unser genetisches Erbe ist viel reicher, denn unser Stammbaum enthält einen großen Teil der Gesamtpopulationen, die vor vielen Generationen gelebt haben. Auch unser Familienname besagt nicht viel über unsere Herkunft.

Mitochondriale Gene enthalten vor allem Informationen über die zelluläre Energieproduktion. Die meiste Information, die uns als menschliche Wesen kennzeichnet, steckt in den so genannten Kern-Genen, die mehr als 99,99 Prozent des menschlichen Genoms ausmachen. Jedes Mal, wenn sich ein Paar fortpflanzt, vermischen sich diese Gene durch Rekombination. Könnten wir alle Zweige verfolgen, durch die wir unsere Gene geerbt haben, würden wir wahrscheinlich feststellen, dass all unsere Ahnen etwas zu unserem genetischen Erbe beigetragen haben, und sei es noch so wenig. Nicht nur die mitochondriale Eva, sondern wohl auch die meisten ihrer Zeitgenossen haben stille Spuren in unserem gemeinsamen Genom hinterlassen.

Wenn sich wieder einmal jemand seines königlichen Geblüts brüstet, können wir uns trösten: Mit recht hoher Wahrscheinlichkeit haben auch wir adelige Ahnen. Das wird durch die schnelle Vermischung der genealogischen Zweige binnen einiger Dutzend Generationen praktisch garantiert. Zweifelhaft bleibt freilich, wie viel königliches Erbe Sie noch in Ihren Genen tragen. Abstammung ist nicht gleichbedeutend mit Genen. Und darüber, wie sehr wir uns genetisch gleichen, streiten die Gelehrten weiter. ◁

Susanna C. Manrubia promovierte 1996 in Physik an der Polytechnischen Universität von Katalonien in Barcelona. Sie forscht am Zentrum für Astrobiologie in Madrid, interessiert sich für biologische Evolution und hat mathematische Modelle für komplexe Systeme untersucht. **Bernard Derrida** (Mitte) promovierte 1979 an der École normale supérieure (ENS) in Paris. Seit 1993 ist er Physikprofessor an der Université Pierre et Marie Curie und an der ENS. Er wendet die statistische Mechanik auf biologische Probleme an. **Damián H. Zanette** ist Professor am Centro Atómico Bariloche und am Instituto Balseiro in Argentinien. Er promovierte 1989 mit einer Arbeit über kinetische Gastheorie. Er untersucht soziale und biologische Systeme mit Methoden der statistischen Physik.

© American Scientist
www.americanscientist.org

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

At the boundary between biological and cultural evolution: The origin of surname distributions. Von Susanna C. Manrubia und Damián H. Zanette in: Journal of Theoretical Biology, Bd. 216, S. 461, 2002

The Seven Daughters of Eve. Von Brian Sykes. W. W. Norton, New York 2001

Vertical transmission of culture and the distribution of family names. Von Damián H. Zanette und Susanna C. Manrubia in: Physica A, Bd. 295, S. 1, 2001

Recent common ancestors of all present-day individuals. Von Joseph T. Chang in: Advances in Applied Probability, Bd. 31, S. 1002, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/896268.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Rollen mit Ballbots

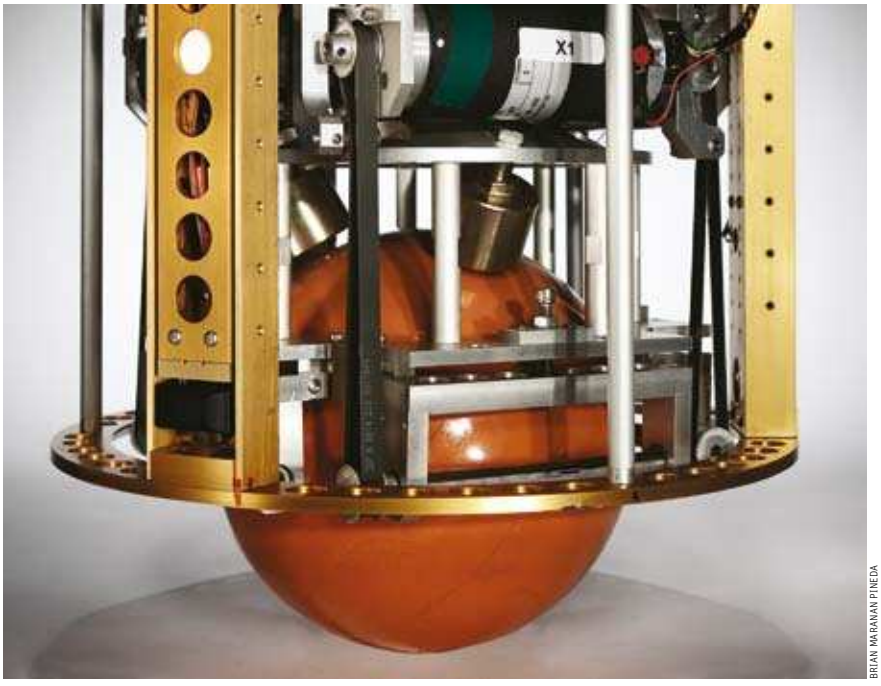
Roboter, die sich nicht auf zwei Beinen, sondern auf einer Kugel fortbewegen, könnten hinreichend mobil sein, um einmal auch Menschen im Alltag zu unterstützen.

Von Ralph Hollis

Unwiderstehlich scheint für viele der Traum vom intelligenten, mobilen Roboter, der Menschen im Alltag zu Hause, im Büro oder im Krankenhaus zur Hand geht. Obwohl dies ein uraltes Lieblingsthema von Sciencefiction-Autoren und Robotik-Forschern ist, scheint das Ziel immer noch in ferner Zukunft zu liegen.

Ingenieure haben fundamentale Probleme damit zu erkennen, wie Roboter ihre Welt wahrnehmen und abbilden, welche Schlussfolgerungen sie dabei nach welchen Regeln ziehen, wie sie mit Gegenständen umgehen und wie sie sich fortbewegen. Immerhin wurden inzwischen Roboter konstruiert, die sich durchaus nützlich machen können. 2002 setzte eine Forschergruppe am Eingang des Gebäudes in Edmonton (Kanada), in dem gerade die Amerikanische Gesellschaft für Künstliche Intelligenz tagte, einen Roboter ab.

Zügig fand die gewitzte Maschine den Weg zum Anmeldeschalter, schrieb sich für die Konferenz ein, ließ sich einen Vortragsraum zuweisen, begab sich zu dieser Veranstaltung und hielt zum vereinbarten Zeitpunkt einen kleinen Vortrag über sich selbst. Andere Roboter haben zwischenzeitlich effektiv als Museumsführer gedient, andere leisten nützliche Dienste als Krankenpflegehilfen. Computerwissenschaftler und Ingenieure haben mobile Systeme mit Armen und Händen zur Handhabung von Gegenständen ausgerüstet. All diese Versuchsapparate bewegen sich auf drei oder vier Rädern. Konstrukteure nennen diese Konfigurationen »statisch stabil«, weil sie den Roboter auch in Ruhestellung aufrecht halten. Roboter, die groß genug sind, um sich in menschlicher Umgebung zu bewegen, haben jedoch einen hoch gelegenen Schwerpunkt und dür- ▷



BRIAN MARANAN PINEDA

Einen neuen Typ mobiler Roboter könnte der hier gezeigte Ballbot darstellen: Platz sparend, beweglich und trotz seiner Fußkugel immer »dynamisch stabil«. Rechts: die Studenten Eric Schearer (links) und Anish Mampetta mit dem Prototyp; unten: der Roboterfuß im Detail.

In Kürze

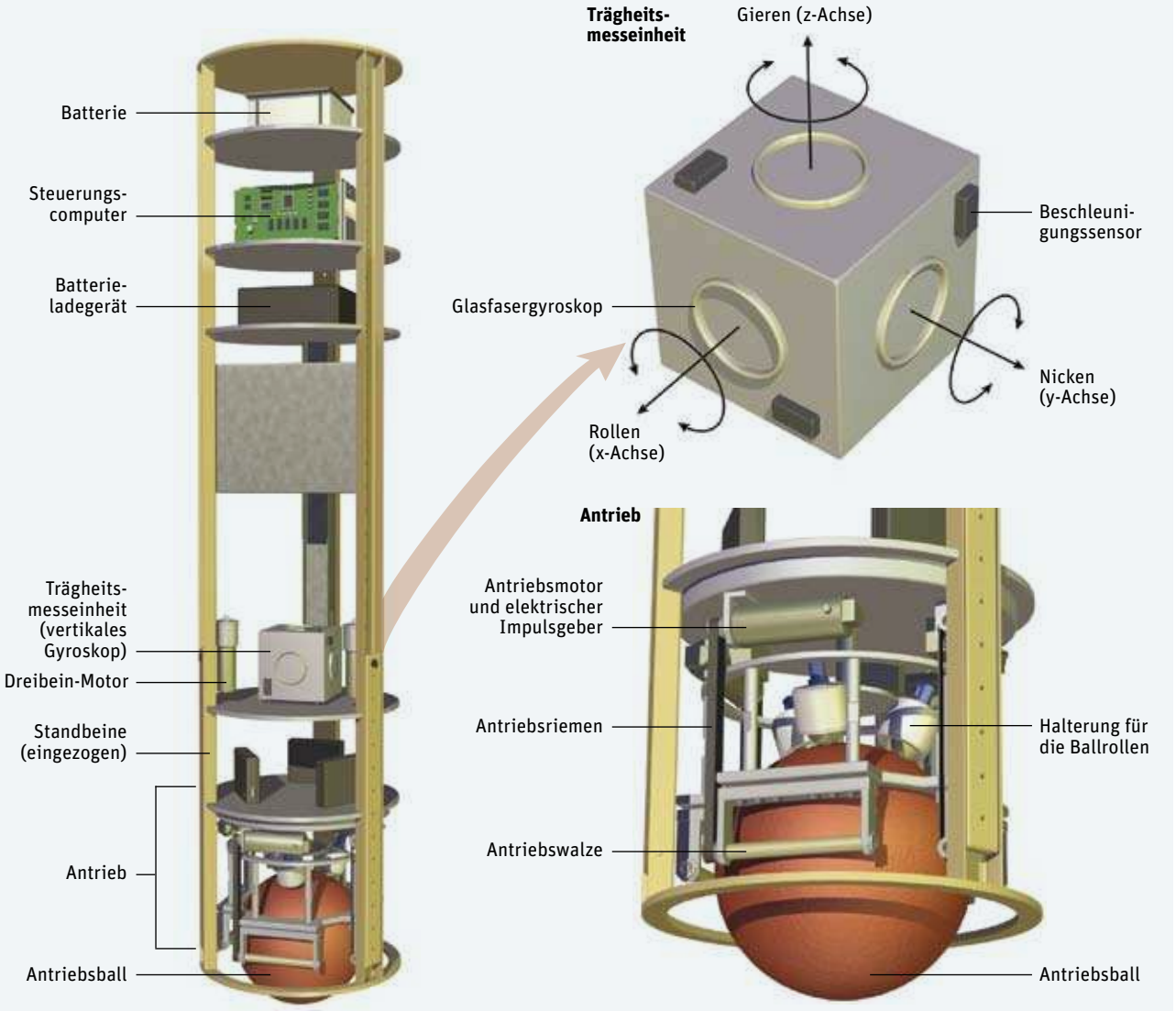
- Ballbots sind **dünne, große Roboter**, die sich auf einer Rollkugel rasch in beliebige Richtungen fortbewegen können. Sie könnten in beengten Räumen nützlich sein, um etwa hifsbedürftige Menschen zu unterstützen.
- Um mit **Menschen im Alltag** umgehen zu können, werden intelligente, mobile Roboter aufrecht stehen und sich bewegen, ohne dauernd anzuecken.
- Die meisten derzeitigen Robotertypen haben **Füße oder mehrere Räder**, weshalb sie breiter gebaut sind und sich nur schwerfällig bewegen können.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Der Bauplan eines Ballbot

In gewisser Weise ähnelt der Ballbot (links) einem Kugelschreiber von rund 1,50 Meter Größe. Die Glasfasergyroskope und Beschleunigungssensoren (rechts oben), die in rechten Winkeln zueinander montiert sind, um die Bewegung in den Gier-, Roll- und Nickachsen zu bestimmen, erzeugen die Daten zur laufenden Ausrichtung an der Vertikalen. Diesen Input benötigt der Computer, um das Gleichgewicht zu halten (siehe Kasten auf der rechten Seite). Der Antrieb für den Ball (rechts unten) arbeitet ähnlich wie eine umgedrehte Computermaus. Motoren bewegen Antriebsrollen, die den Ball drehen, während Leitrollen und optische Impulsgeber die zurückgelegte Strecke des Ballbots vermessen.

Um aufrecht stehen zu bleiben, wenn der Antrieb abgeschaltet wird, fährt die Maschine drei Beine aus.



GEORGE RETSECK

▷ fen, um nicht umzukippen, nur langsam beschleunigen oder bremsen. Deshalb tendieren statisch stabile Roboter zu breiten Körpern auf breitem Radstand; solche plumpen Formen sind aber für ihre Fortbewegung durch Türen und um Möbel oder Menschen herum eher hinderlich.

Vor einigen Jahren beschloss ich daher, das Problem mit den breiten Radständen einfach zu umgehen. Ich konstruierte einen großen, schlanken und beweglichen Roboter, der auf einem einzigen großen, kugelförmigen Rad steht und von diesem auch angetrieben wird. Eine so simple Maschine mit ihrem hoch liegenden Schwerpunkt wäre in der Lage, sich schnell in jede Richtung zu bewegen. Das System würde aktiv balancieren und wäre so »dynamisch stabil«. Es kann sich nur so lange aufrecht halten, wie es seine Körperhaltung korrigiert. Mir fiel auf, dass dieses Design eine bis dahin noch nicht untersuchte Klasse von rollenden Robotern begründen könnte. Mangels einer besseren Bezeichnung nannte ich sie »Ballbots«.

Meine Studenten und ich entwickeln die Automaten jetzt seit 2005. Seitdem haben wir ihre Stabilität und Eignung für den Einsatz in einer menschlichen Alltagsumgebung untersucht. Viele Besucher unseres Labors fanden die geschick-

te Art dieser Einheiten, zu balancieren und auf einer Kugel umherzufahren, ziemlich bemerkenswert.

Menschen steuern ihre aufrechte Haltung mit Hilfe des Gleichgewichtsorgans im Innenohr. Dessen Daten werden mit dem Input aus anderen Sinneskanälen wie etwa dem Sehen kombiniert, um die Muskulatur in Beinen und Füßen so zu steuern, dass wir aufrecht stehen ohne umzufallen. Ein Ballbot regelt sein Gleichgewicht durchaus ähnlich:

- Er braucht ein Ziel: etwa auf einer Stelle zu verharren oder sich auf gerader Linie von A nach B zu bewegen.
- Für sein Gleichgewicht muss er laufend die Orientierung seines Körpers relativ zur Senkrechten kennen.
- Er muss in der Lage sein, den Ball in jede beliebige Richtung zu drehen und den zurückgelegten Weg zu vermessen.
- Um sein Ziel zu verfolgen, benötigt der Roboter ein Steuerprogramm, mit dem er alle Sensordaten auswertet und daraus Befehle für die Rotation des Balls ableitet.

Das »Problem der Vertikalen« hat sich als besonders schwieriges Unterfangen herausgestellt (siehe Kasten rechts). Unsere Lösung basiert auf vielen technischen Fortschritten der jüngeren Zeit, ob bei Computern, Glasfasertechnik oder Mikromechanik. Damit lassen sich heute kostengünstige Geräte produzieren, welche die Funktion traditioneller drehender Gyroskope übernehmen.

Aufrecht dank Sagnac-Effekt

Wir benutzen ein System aus drei Glasfasergyroskopen. Diese sind senkrecht zueinander in einem Behälter untergebracht, der fest mit dem Ballbot verbunden ist (siehe Kasten links). Die Gyroskope besitzen keine rotierenden Massen wie ein traditioneller Kreiselkompass, sondern stattdessen eine Lichtquelle, einen Detektor und eine Glasfaserspule. Lichtwellen laufen ständig in entgegengesetzter Richtung durch die Spule und interferieren am Detektor. Im Betrieb rotiert der Körper des Ballbots mit seinen drei Winkelsensoren in alle Richtungen.

Die Lichtwellen in den Glasfasern laufen immer mit konstanter Lichtgeschwindigkeit durch die Gyroskope – unabhängig von der äußeren Bewegung. Entsprechend entsteht in den Sensoren ein kleiner Gang-Unterschied zwischen den Wellen, die sich im Uhrzeigersinn bewegen, relativ zu denjenigen, die ▷

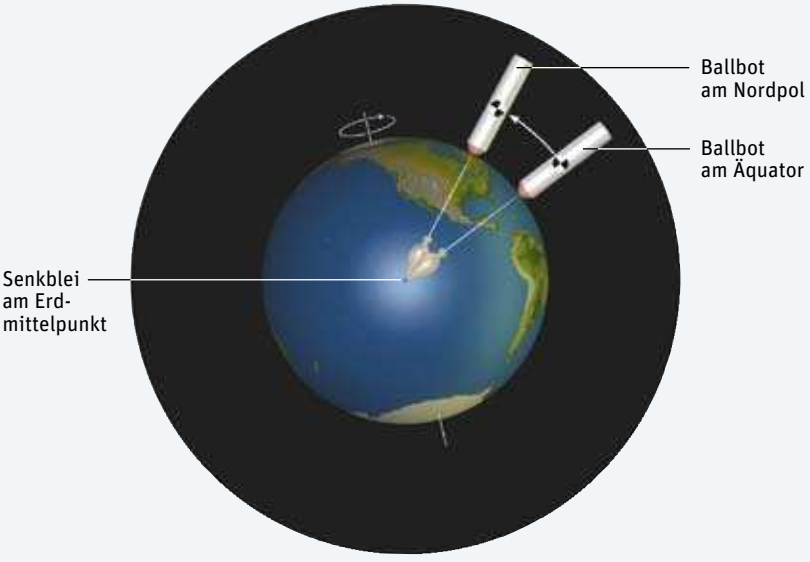
Wo ist oben?

Herauszufinden, was oben oder unten ist (was die frühen Flieger als das Problem der Vertikalen bezeichneten), hat sich als schwierig erwiesen. Ein Lot am Seil zeigt die Vertikale an. Aber ein Ballbot, der mit einem solchen Pendel ausgerüstet wäre, würde dadurch verwirrt, dass der Pendelkörper (etwa ein Senkblei) meistens vor- und zurückschwingt.

Alternativ könnte sich ein Ballbot auf seine Gyroskope stützen. Die Drehscheibe mit den drei Gyroskopen wäre kardanisch, also frei und drehbar aufgehängt, sodass ihre Achse in eine beliebige Richtung zeigen kann. Bevor der Roboter losrollt, könnten Schwungräder mit einem Motor in schnelle Drehung versetzt und die Achse in die Senkrechte gebracht werden. Die Trägheit der Gyroskope ließe die Achse unabhängig von der ausgeführten Bewegung immer in dieselbe Richtung zeigen. Verbindet man die Aufhängung mit Winkelmessern, könnte man die Vorwärts-rückwärts-Neigung (Gieren oder Nicken) sowie die Rechts-links-Neigung (Rollen oder Schlingern) ausmessen. Dieses Verfahren birgt jedoch Probleme. Die Achse der Gyroskope würde in ihrer Richtung verharren, während die Erde rotiert, und dadurch von der Vertikalen abweichen.

Als Ausweg könnte man die Gyroskope mit einem kurzen, mechanischen Pendel kombinieren. Während sich der Ballbot bewegt, würde die Richtung des Pendels über die Zeit gemittelt werden, um einen zuverlässigen Wert für die Senkrechte zu erhalten. (Laterale Beschleunigungen würden sich herausmitteln, sodass die Schwerkraft dominiert.) Das Ergebnis könnte verwendet werden, um Drehmomente auf die Gyroskope auszuüben, um es senkrecht zu halten.

Der deutsche Ingenieur Maximilian Schuler hat diese Lösung 1923 zuerst entdeckt. Dabei stellte er sich ein Pendel vor, das bis zum Mittelpunkt der Erde reicht (siehe Grafik). Ein so langes Pendel würde immer nach unten zeigen, unabhängig von der Bewegung, und mit einer Periode von 84,4 Minuten schwingen. Diese so genannte Schuler-Periode entspräche der Umlaufperiode eines Satelliten, der die Erde genau auf Meereshöhe umkreist. Dies ist die minimale Umlaufperiode, die ein frei um die Erde fallender Körper theoretisch haben könnte. Schuler zeigte nun, wie kleine Drehmomente, die auf ein Gyroskop wirken, die Periode eines kurzen Pendels auf 84,4 Minuten verlängern würden, was tatsächlich das Problem löst, indem es das Pendel immer senkrecht zur Erdoberfläche ausrichtet. Unser Ballbot verwendet Glasfasergyroskope und mikroelektromechanische Beschleunigungssensoren. Sie simulieren die Funktion eines Gyroskops, das mit einem Pendel kombiniert ist. Es stellt ein »vertikales« Gyroskop dar, das immer erkennt, wo »oben« ist. Daran orientiert sich der Ballbot, um sein Gleichgewicht zu halten. *R. H.*



GEORGE RETSECK

▷ entgegengesetzt dazu umlaufen. In jedem Fall verschiebt diese Differenz im Detektor das Interferenzmuster. Das erzeugt ein Messsignal proportional zur Winkelgeschwindigkeit. Der Effekt wurde vom französischen Physiker Georges Sagnac bereits 1913 entdeckt. Ein kleiner Computer summiert die Winkelgeschwindigkeiten für die drei Raumrichtungen auf und bestimmt damit die Neigung in Vorwärts-rückwärts-Richtung, das Kippen in Rechts-links-Richtung sowie die Drehung um die vertikale Achse des Roboterkörpers.

Um die korrekte vertikale Orientierung zu bestimmen, müssen alle Gyroskope die Erdrotation berücksichtigen, zudem noch einige kleinere Effekte, die sonst mit der Zeit zu Fehlern und Abweichungen in Form einer Drift führen würden. Unser System enthält drei Beschleunigungssensoren, die senkrecht zueinander und parallel zu den Gyroskopen montiert sind. Während der Ballbot umherrollt, registrieren diese Sensoren stets die momentane Beschleunigung. Ein Computer errechnet daraus Gesamtwert und Richtung der Beschleunigung und mittelt sie über die Zeit. (Die Beschleunigungsdaten können nicht direkt für das Balancieren verwendet werden.) Mit diesem Input ermittelt das System einen zuverlässigen Langzeitindikator für die Richtung der Schwerkraft, der im Glasfasergyroskop zur Korrektur der Driftbewegung dient.

Zirkusclown auf der Kugel

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Ball mit Motoren in verschiedene Richtungen zu bewegen. Wir suchten nach einem möglichst einfachen Antrieb. Verschiebt man mit der Hand eine mechanische Computermaus, verdreht die mit Gummi überzogene Kugel auf der Unterseite zwei senkrecht zueinander gelagerte Räder. Die Drehung der Rädchen wird gemessen und versorgt den Computer mit dem Input, um den Zeiger entsprechend über den Bildschirm zu bewegen.

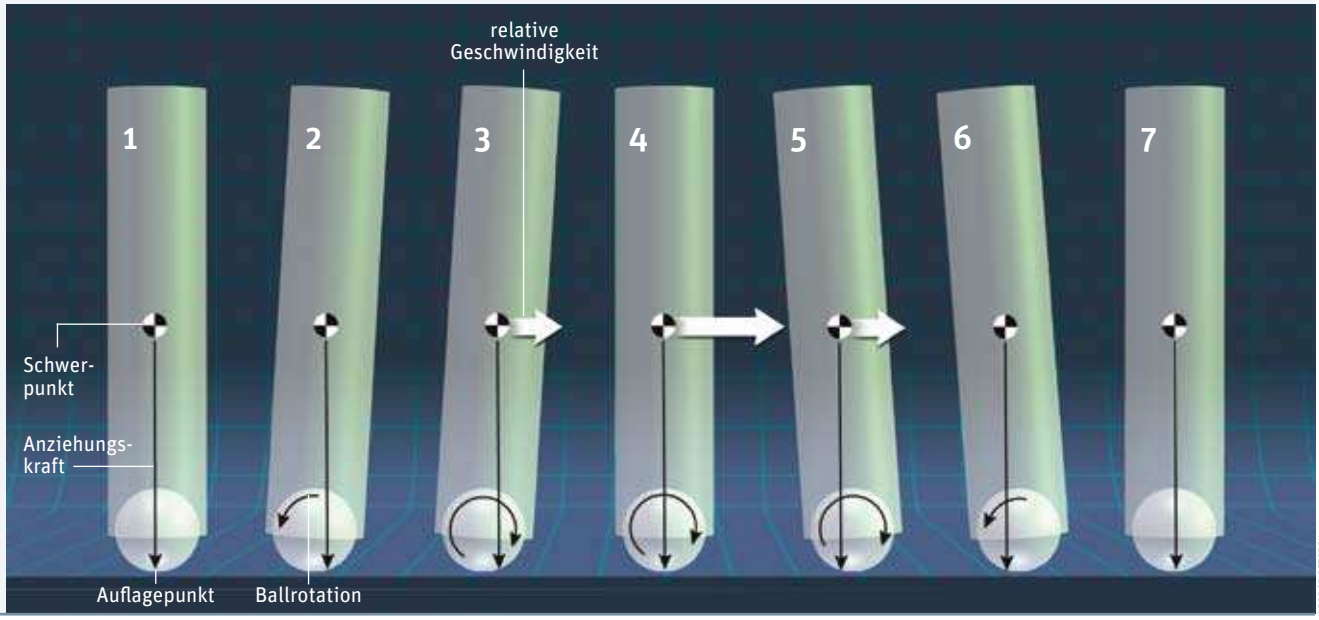
Beim Ballbot geschieht genau das Umgekehrte. Der Ballbotcomputer dirigiert zwei Motoren; diese treiben die Räder an, die den Ball rotieren lassen, was wiederum den Roboter in jede gewünschte Richtung bewegt. Im Wesentlichen entspricht das einem »inversen« Mausballantrieb. Derzeit treiben die Motoren den Ball in der Kipprichtung sowie nach links oder rechts. Ein dritter Motor soll einmal den Körper auch um die vertikale Achse drehen. Damit könnte sich der Roboter dann in alle Richtungen drehen.

Ähnlich wie ein Zirkusclown steht der Ballbot auf seiner Kugel. Dabei handelt es sich um eine hohle Aluminiumkugel, überzogen mit einer dicken Gummischicht. Weil die Rollen immer über den Ball gleiten, muss deren Reibung und Dämpfung ausgeglichen werden. Zwischen Ball und Rumpf tragen drei Kugellager das Gewicht des Roboterkörpers. Die Ballrotation und damit die zurückgelegte Wegstrecke messen wir mit Lichtsensoren und einem Streifensystem auf einer antriebslosen Leitwalze.

Jeder Ballbot kennt die Senkrechte und errechnet daraus, wie er den Ball drehen muss, um sein Gleichgewicht zu halten und sich fortzubewegen. Physika-

Rollen von A nach B

Um Balance zu halten, muss ein Ballbot seinen Schwerpunkt genau über dem Auflagepunkt halten (1). Die Maschine bestimmt ihren momentanen Zustand mit Hilfe von Richtungs- und Neigungssensoren, die feststellen, wo »oben« ist, und die Lage des Körpers mit der Senkrechten vergleichen. Während der Bewegung reguliert der Ballbot laufend seinen Schwerpunkt. Um zum Beispiel von A nach B zu gelangen, bewegt er den Ball leicht in die zur geplanten Bewegung entgegengesetzte Richtung (2). Das kippt den Roboter leicht nach vorne, sodass er sich in Bewegung setzt. Als Nächstes dreht der Ball sich in die Richtung der Bewegung, um vorwärts zu beschleunigen (3). Solange sich der Roboter mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, muss er nahezu senkrecht stehen (4). Die umgekehrten Aktivitäten müssen beim Bremsen eingeleitet werden (5, 6), was den Ballbot zum Stehen bringt (7). Bei Steigungen muss der Körper sich leicht vorwärts in die Schräge hineinlehnen, um sein Gleichgewicht zu halten.



GEORGE RETSECK

lisch gesprochen ist ein Ballbot im Prinzip ein umgedrehtes Pendel, ein System also, das Forscher bestens untersucht haben. Wir benutzen Methoden der Theorie optimierter Steuerungen, um den Ballbot an sein Ziel zu bringen und gleichzeitig den Aufwand dafür zu minimieren.

Der Roboter hat acht interne Zustände, um diese Lösungswege umzusetzen: vier für seine Vorwärts-rückwärts-Bewegung und vier für die Rechts-links-Bewegung. Für jede der Richtungen berechnet das System aus den Sensordaten, wo sich der Roboter gerade befindet, wie schnell er sich bewegt und welche Neigung der Körper einnimmt.

Minimale Wirkung

Für die Beschreibung der Roboterbewegung verwenden wir ein vereinfachtes lineares mathematisches Modell. Rudolf Kalman, ein ungarisch-amerikanischer Systemtheoretiker, hat 1960 eine elegante Methode entwickelt, wie man Kontrollstrategien aus solch einem System ableitet, die er »linear-quadratischer Regulator« nannte. Er ging davon aus, dass eine Messung der internen Systemzustände proportional zu den Werten des internen Systemzustands selbst ist. Außerdem nahm er an, dass die Zustände sich mit der Zeit proportional zum Zustand selbst ändern, zusammen mit einem Beitrag, der diverse Regelungsprozesse berücksichtigt, beispielsweise die Wirkung der Motordrehmomente.

Kalmans Verfahren folgt, technisch gesprochen, dem Prinzip der minimalen Wirkung. Die Lösung der Minimierung liefert einen Satz von Konstanten, der, multipliziert mit aktuellen Daten des Systemzustands, eine bevorzugte oder optimale Regelungsanweisung erstellt, die der Ballbot umsetzen muss. Diese Berechnungen laufen im Hauptcomputer des Roboters mehrere hundert Mal in der Sekunde ab.

Soll der Ballbot einfach still stehen bleiben, dann versucht die Kontrollstrategie seine Geschwindigkeit, Neigung und Kipprate auf null zu reduzieren. Gleichzeitig minimiert sie die dafür nötige Regelungsaktivität. Lautet das Ziel dagegen, von einem Ausgangspunkt A zu einem Zielpunkt B zu gelangen, dreht die Regelung den Ball rückwärts (retrograd). Dadurch neigt sich der Körper in Richtung des Ziels, sodass der Roboter nach vorne beschleunigen kann. Sobald er sich der Zielposition nähert, beschleunigt der Ball automatisch, um sich nun in die Gegenrichtung zu neigen und den Ballbot anzuhalten.

Wir kommunizieren mit dem Ballbot über eine kabellose Verbindung. Wir planen, das Gerät um Arme und insbesondere einen Kopf zu ergänzen, der nicken und sich drehen kann, zwei Augen hat sowie weitere Sensoren. Mit diesen Erweiterungen soll der Roboter einen größeren Grad an Autonomie bekommen. Damit wollen wir untersuchen, inwieweit sich solche mobilen Geräte im Umfeld von Menschen in deren Alltagsumgebung bewegen können; außerdem haben wir vor, seine Geschwindigkeit, Sicherheit und Navigationskünste mit denen klassischer, statisch stabiler Roboter zu vergleichen.

Unsere Hypothese ist, dass sich Letztere in einer technologischen Sackgasse befinden könnten, wenn sie in solchen Umgebungen ohne Probleme navigieren sollen.

Wir sind keineswegs die Einzigen, die auf dynamisch stabile Prototypen setzen. Andere Forschungsteams haben zweirädrige Roboter gebaut, die in einer Dimension, der Rollrichtung, dynamisch stabil sind, in der anderen Richtung jedoch statisch stabil. Obwohl diese Geräte sich also nicht omnidirektional bewegen können wie unsere Ballbots, erweisen auch sie sich als viel versprechend, besonders im Außenbereich.

Es mag sein, dass sich auf lange Sicht dynamisch stabile, zweifüßige Einheiten, vielleicht auch in humanoider Form, durchsetzen werden, insbesondere wegen ihrer Fähigkeit, Treppen zu steigen. Gruppen in aller Welt entwickeln solche komplexen und teuren Maschinen.

In der Zwischenzeit aber bilden Ballbots jedenfalls interessante und effektive Studienobjekte, die zeigen, wie mobile Roboter mit Menschen in belebter Umgebung dynamisch und elegant interagieren können. ◁

Ralph Hollis ist Forschungsprofessor am Robotik-Institut der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (www.ri.cmu.edu/people/hollis_ralph.html). Er promovierte 1975 in Festkörperphysik an der Universität von Colorado. Bevor er zur Carnegie Mellon University ging, arbeitete er bei North American Aviation und am Thomas J. Watson Forschungszentrum bei IBM.

A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouseball drive. Von T. Lauwers et al. in: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2006

One is enough! Von T. Lauwers, G. Kantor und R. Hollis in: Robotics Research: The Twelfth International Symposium, October 2005 (www.ri.cmu.edu/pubs/pub_5459.html)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874885.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **SpektrumTALK** unter www.spektrum.de/talk.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Krebs – eine
Nebenwirkung der Evolution?

SERIE PHÄNOMEN KREBS:
Teil I: Krebsevolution
Teil II: Chromosomenchaos
Teil III: Krebsgenom-Atlas

In dieser und den kommenden beiden Ausgaben stellen wir drei übergreifende Richtungen der Krebsforschung vor. Im aktuellen Heft erfahren Sie, wie Evolutionsforscher Krebs erklären. Im Oktober geht es um das genetische Chaos in Krebszellen – oft sind ganze Chromosomen stark verändert. Im November behandeln wir das ehrgeizige Riesenprojekt »Krebsgenom-Atlas«.

Warum merzen Selektionskräfte den Krebs nicht aus? Im Gegenteil – die Evolution scheint ihm sogar Waffen zu liefern. Abwehrmechanismen des Körpers gegen Krebs lohnen sich offenbar nur eingeschränkt. Sie müssen klare Fortpflanzungsvorteile bringen.

Von Carl Zimmer

Die natürliche Auslese – oder Selektion – schafft nicht Perfektion. Selektionskräfte fördern in Evolutionsprozessen hochkomplexe Anpassungen. Gegen körperliche Leiden sind wir trotzdem nicht gefeit. Zu den gefürchtetsten Krankheiten, wohl auch zu den am wenigsten verstandenen, gehört der Krebs. Ein bösartiger Tumor etwa ist seinerseits auf groteske Weise hervorragend daran angepasst, sich im Körper zu behaupten und die Oberhand zu gewinnen.

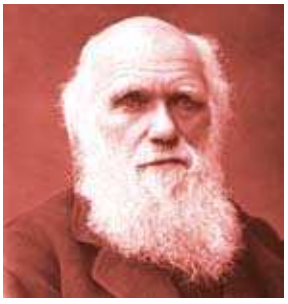
Krebszellen teilen sich wieder und wieder, auch noch dann, wenn ihre normalen Schwestern längst aufhören würden, sich zu vermehren. Sie verschaffen sich Platz, indem sie gesundes Gewebe um sich herum zerstören. Sie verstehen den Organismus zu überlisten, sodass er sie mit Energie für noch mehr Wachstum versorgt. Vertrackterweise ist Krebs bei all dem kein Fremdorganismus, kein von außen eingedrungener Parasit, sondern körpereigene Zellen wenden sich gegen uns. Merkwürdig auch, dass eine Krebserkrankung so viele Menschen heimsucht. Mindestens jeder Dritte muss statistisch gesehen damit rechnen.

Wie kann die Evolutionsbiologie das Phänomen Krebs erklären? Wie kann es sein, dass wunderbar zweckmäßige Anpassungen wie Augen oder Immunsysteme entstehen konnten, dass die Natur es aber nicht schaffte, den Krebs auszurotten? Biologen antworten darauf: Das scheinbare Paradox hängt mit der Evolution selbst zusammen. Einerseits entstanden in der Stammesgeschichte durchaus Schutzmechanismen – die aus verschiedenen Gründen allerdings nur in Grenzen helfen. Andererseits liefern manche hoch entwickelten Anpassungen dem Krebs geradezu sein Werkzeug.

Diese Forschungsrichtung steckt erst in den Anfängen. Die Mechanismen im Hintergrund sind längst noch nicht völlig klar, und so manche Hypothese steht noch ungeprüft im Raum. Ein Teil der medizinischen Krebsforscher erwartet von derartigen Konzepten eher wenig Fortschritte bei der Krebsbekämpfung. Tatsächlich glauben auch die betreffenden Evolutionsbiologen nicht, dass sie in Kürze eine neue Therapie aufzeigen werden. Doch erhoffen sie sich vom Evolutionsansatz, auf bisher nicht erkannte Zusammenhänge zu stoßen, die sich dann medizinisch auswerten lassen. So betont auch die Molekularbiologin und Zellforscherin Judith Campisi von der Universität von Kalifornien in Berkeley, eine Vertreterin der neuen Richtung: »Natürlich haben wir das immer im Hinterkopf.«

Krebs ist eine Krankheit von vielzelligen Lebewesen. Die ersten mehrzelligen Tiere entstanden vor rund 700 Millionen Jahren aus Einzellern, somit aus Organismen, die sich durch Zweiteilung zu vermehren pflegten. Von ihren Vorfahren übernahmen die Vielzeller das Prinzip der Zellteilung – und sie erbten auch den molekularen Apparat dafür. Nur blieben die Zellen nun zusammen, bildeten gemeinsam einen Körper und differenzierten sich zu verschiedenen Geweben und Organen aus.

Um die Ausbildung der immer aufwändigeren Erscheinungsformen zu steu- ▷



RICHARD MILNER ARCHIVES

Eignen sich Konzepte der Evolutionstheorie auch dazu, Krebs – zumindest teilweise – zu erklären? Dieses Foto von Charles Darwin (1809–1882), des Begründers dieser Theorie, entstand im Jahr vor seinem Tod.

ern, benötigten die Vielzeller neue Gene. Diese Erbanlagen beziehungsweise von ihnen gebildete Moleküle kontrollieren in den mehrzelligen Organismen die Zellteilungen und gebieten dem Wachstum rechtzeitig Einhalt, wenn ein Organ groß genug ist. Wie perfekt das Wechselspiel normalerweise funktioniert und wie hervorragend sich Vielzelligkeit in der Evolution bewährte, davon zeugen heute nicht zuletzt Millionen verschiedener Tierarten. Doch hat das Dasein als Vielzeller auch ganz eigene Schattenseiten. Jede einzelne Zellteilung birgt ein winziges Risiko, dass eine Krebs fördernde Mutation aufkommt. In den Worten Campisis: »Bei jeder Teilung besteht die Gefahr, dass sich dabei eine Krebszelle entwickelt.«

Zum Beispiel treten gelegentlich Mutationen auf, durch die Kontrollmechanismen verloren gehen, sodass sich die Zellen fortan unkontrolliert vermehren. Die missliche Situation wird verschärft, wenn andere Mutationen denselben Zellen ermöglichen, in umgebendes Gewebe einzuwandern oder sich gar über den Körper zu verteilen. Wieder andere Erbveränderungen gestatten es Krebszellen, der Immunabwehr zu entschlüpfen. Es gibt auch Mutationen, die einem Tumor zu einer guten Versorgung mit Blutgefäßen verhelfen.

Man könnte auch sagen: Was Krebszellen durchmachen, ähnelt in manchem dem, wie sich Organismen in einem Evolutionsprozess an die Umwelt anpassen. Auf Organismenebene können Selektionskräfte bewirken, dass Individuen mit entsprechenden Mutationen im Vergleich zu anderen einen höheren Fortpflanzungserfolg haben. Denn durch die Auslese wird der Anteil von Trägern der neuen Mutation über die Generationen zunehmen.

Überträgt man diese Bilder auf Krebs, muss man an die Stelle von Organismen Zellen setzen. Weil sie bestimmte Mutationen erwerben, können sich manche Zellen effizienter fortpflanzen, sprich vermehren, als ihre unveränderten Schwestern. Das gilt sogar innerhalb eines bösartigen Tumors: Manche der Krebszellen besitzen Erbveränderungen, die ihnen nochmals gegenüber anderen Krebszellen Vorteile bringen. Die Biomathematikerin Natalia Komarova von der Universität von Kalifornien in Irvine meint dazu: »Das läuft ab wie bei der Darwin'schen Evolution. Nur spielt sich das Ganze in einem Organ ab.«

Manches erscheint ähnlich wie in der Evolution: Krebszellen pflanzen sich effizienter fort

Wie schon angedeutet, vermag unser Körper Krebs bedingt Einhalt zu gebieten – mit verschiedenen Maßnahmen, deren Dasein vermutlich auf Ausleseprozesse zurückgeht. Die entsprechenden Mutationen dürften sich unter unseren Ahnen durchgesetzt haben, weil deren Träger in jungen Jahren weniger oft als andere Individuen an Krebs starben und deswegen mehr Chancen hatten, Kinder zu bekommen und großzuziehen – also jene schützenden Anlagen zu vererben. Evolutionsbiologen versuchen nun mit dem Rüstzeug ihres Fachs herauszufinden, warum diese Gegenwehr trotz allem so oft nicht greift. Das heißt, sie versuchen vom Evolutionsansatz her zu verstehen, wieso diese Mechanismen nur in Grenzen wirken.

Zu den wirksamsten solchen Waffen gehören die Tumorsuppressorproteine. Einige von ihnen passen offenbar darauf auf, wie sich die Zelle vermehrt. Tut sie das auf ungewöhnliche Art, veranlassen solche Proteine entweder, dass die Zelle abstirbt oder dass sie vorzeitig altert und sich nicht mehr teilt. So wichtig die Tumorsuppressorproteine für unsere Gesundheit sind, haben sie dennoch Tücken. Tatsächlich wären wir in mancher Hinsicht ohne sie besser gestellt. Das erkannten Wissenschaftler erst vor Kurzem.

Norman E. Sharpless von der Universität von North Carolina in Chapel Hill untersuchte mit seinen Kollegen an Mäusen verblüffende Effekte des Tumorsuppressorproteins p16 (genauer p16-Ink4a). Von einem genmanipulierten Mäusestamm, der dieses Protein nicht bilden konnte, erkrankte erwartungsgemäß eine Anzahl von Tieren an Krebs, teils mit kaum einem Jahr. Die günstige Seite war allerdings: Gesund gebliebene Tiere dieses Stamms besaßen im Alter praktisch junge, noch gut regenerationsfähige Zellen. Das zeigte sich, als die Forscher bei diesen Mäusen die Insulinzellen in der Bauchspeicheldrüse zerstörten, die für die Zuckerversorgung des Körpers lebenswichtig sind. Kontrollmäuse wurden nach dem gleichen Eingriff schwer zuckerkrank und starben. Die genmanipulierten Nager bekamen aber nur einen leichten Diabetes. Sie überstanden den Versuch, weil sich Vorläufer von Insulinzellen rasch genug vermehrten, um die Bauchspeicheldrüse neu zu bestücken und den Verlust einigermaßen auszugleichen. Ähnliche Unterschiede fanden die Forscher für Blut- und Gehirnzellen. Das Protein p16 schützt Mäuse vor Krebs, aber es macht alt.

Diese Ergebnisse stützen eine Hypothese Campisis, wonach Selektionsprozesse Krebs hemmende Proteine wie p16 nur in Maßen begünstigen dürfen. Mit zu aggressiven Tumorsuppressorproteinen würde der Körper zu schnell altern, mit den entsprechenden gesundheitli-

In Kürze

- Selektionskräfte der Evolution bestärken nur eingeschränkt molekulare Mechanismen, die **Krebserkrankungen verhindern**. Zwar existieren gewisse Abwehrmechanismen. Diese bewirken meist allerdings weniger, dass Krebs überhaupt nicht mehr auftritt. Vielmehr helfen sie, den Ausbruch bis in ein höheres Lebensalter zu verzögern.
- Manche Gene wurden in der Evolution anscheinend sogar begünstigt, obwohl deren Proteine die **Entstehung von Krebs unterstützen** oder dessen Aggressivität fördern. Diese Erbanlagen sind für andere Errungenschaften wichtig.
- Wenn Forscher die Entwicklungsgeschichte von Krebs besser verstehen – und wenn sie erst begreifen, wie sich die einzelnen Tumoren im Organismus entwickeln –, könnten sie **neue Ansatzpunkte der Krebskämpfung** finden.

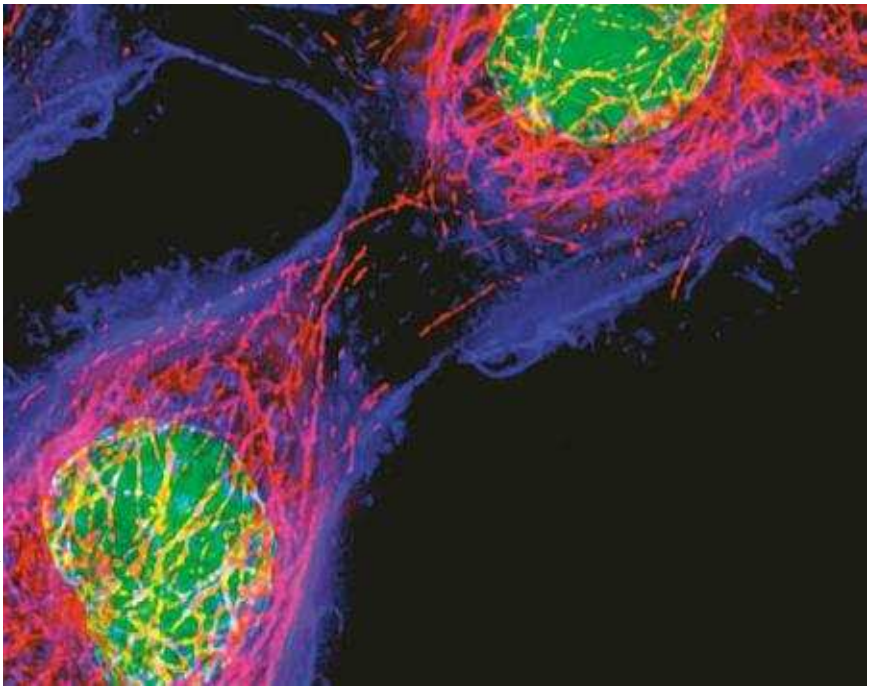


PHOTO RESEARCHERS INC. / UNIVERSITY OF DUNDEE, PAUL ANDREWS

Bei jeder Zellteilung kann eine Mutation auftreten, die Krebs hervorrufen könnte. Hier die letzte Phase einer Teilung

chen Nachteilen, vermutet die Zellforscherin. Auch wenn Campisi ihre Idee noch eine Arbeitshypothese nennt, freut sie sich doch, dass immer mehr Befunde dazu passen.

Bei der natürlichen Auslese in der Natur kommt es nicht darauf an, dass ein Krebsabwehrmechanismus hundertprozentig wirkt. Es genügt, wenn er eine Erkrankung so lange hinauszuzögern vermag, dass die Besitzer dieses Gens relativ mehr Kinder in die Welt setzen. In dem Fall werden Selektionskräfte solch einen Faktor begünstigen. Uns erscheint das gegenüber alten Menschen grausam. Jarle Breivik von der Universität Oslo meint zur Krebsbürde des Alters: »Die natürliche Selektion funktioniert nicht so, dass sie genetische Anlagen deshalb fördert, weil diese uns ein langes, glückliches Leben verschaffen.« Vielmehr komme es darauf an, dass die genetische Information Eigenschaften vermittelt, auf Grund derer sie in die nachfolgenden Generationen gelangt.

Was viele vielleicht nicht erwarten: Es könnte sogar sein, dass Antikrebsproteine wie p16 im Alter mehr schaden als nützen. Sie stehen im Verdacht, in späteren Jahren Krebs zu schüren. Versetzt p16 eine Zelle sozusagen in den Altersruhestand, dann hört diese zwar auf, sich zu vermehren, aber sie erzeugt nun auch ein verrücktes Proteingemisch. Darunter ist ein Wachstumsfaktor, der mehr Blutgefäße sprießen lässt. Dieser Faktor, VEGF genannt, hilft die Blutgefäßversorgung bei Krebstumoren und somit deren Ernährung verbessern. Aus solchen Gründen könnte p16, indem es die Menge seniler Zellen erhöht, vermutlich die Krebsgefährlichkeit im Alter steigern.

Mehr Schutz bei höherem Risiko

Viele Krebserkrankungen entstehen wohl deswegen relativ spät, weil es zuvor mehrere Schutzwälle – einen nach dem anderen – niederzureißen gilt. Ein Beispiel dafür ist der Dickdarmkrebs. Mehrere Gene müssen mutiert sein, damit eine Darmzelle bösartig wird. Trotzdem handelt es sich um die dritthäufigste Krebsform überhaupt (die Gründe dafür siehe weiter unten). Aber die vielfältigen Hürden dürften zumindest die Erkrankungsgefahr im jüngeren Lebensalter senken. Im statistischen Durchschnitt tritt Darmkrebs um das siebzigste Lebensjahr auf.

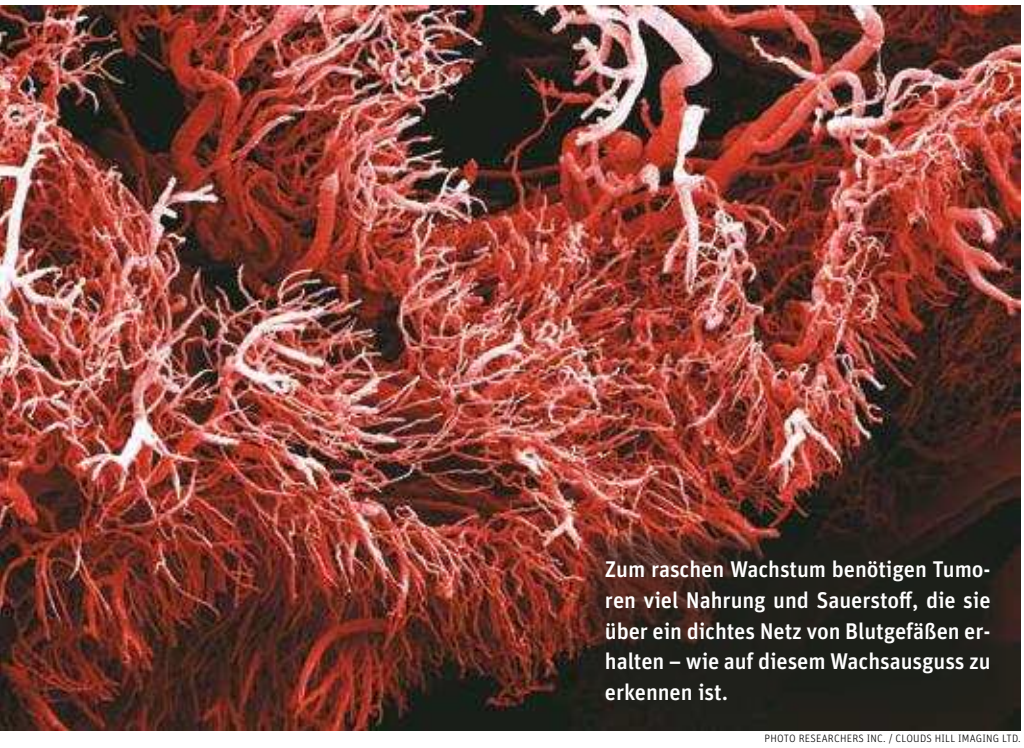
Nun treffen nicht alle Krebsformen vor allem Ältere. Beispielsweise sucht das Retinoblastom, bei dem Zellen der Augennetzhaut entarten, vor allem kleine Kinder heim. Der Populationsgenetiker Leonard Nunney von der Universität von Kalifornien in Riverside erklärt die unterschiedlichen Erkrankungsalter bei verschiedenen Krebsarten durch die Evolutionsmechanismen, die Populationen (von Individuen) verändern – denn Evolution findet in Populationen statt. Demnach etablieren sich Schutzschilder für bestimmte Zell- oder Gewebetypen durch Selektion nur bei einem hohen Krebsrisiko, und zwar, weil sich dies nur dann über Nachkommen auszahlt. Bei einem geringen Risiko sei der Selektionsdruck einfach zu schwach.

Im einen Fall, beim Dickdarmkrebs, ist die Gefahr generell sehr hoch, dass in irgendwelchen der Darmzellen gefährliche Mutationen auftreten. Denn diese Zellen vermehren sich zeitlebens stark. Sie werden immerfort abgeschilfert und müssen erneuert werden. Dabei ist besonders gefährlich, dass der Dickdarm ein großes Organ ist und entsprechend viele Zellen jederzeit potenziell mutieren können.

Bei der Netzhaut (Retina) bestehen völlig andere Voraussetzungen. Es handelt sich um ein ziemlich kleines Gewebe. Außerdem vermehren sich Netzhautzellen nur in den ersten fünf Lebensjahren. Ein Retinoblastom tritt denn auch vergleichsweise selten auf. Nunney schließt daraus, dass sich bei diesem Krebs eine Selektion auf schützende oder hinauszögernde Mechanismen in der Gesamtpopulation von Individuen wenig bemerkbar machen würde. Dagegen würden sich Eigenschaften, die das Auftreten von Dickdarmkrebs hinausschieben, wegen der deutlichen Auswirkungen auf die Nachkommenzahlen bald durchsetzen.

Die neue Forschungsrichtung beschäftigt auch der folgende Zusammenhang: Manche der genetischen Neuerungen in der menschlichen Evolution könnten – als Nebenwirkung – Krebszellen gefährlicher machen. Dieser Verdacht kam Evolutionsforschern, als sie herausfinden wollten, was den Menschen in molekularer und genetischer Hinsicht auszeichnet. Die Hominiden erfuhren eigene Selektionsprozesse, seit sie sich vor vielleicht sechs Millionen Jahren von den Menschenaffen getrennt hatten und sich an ein Leben in der Savanne anpassten, wobei sie den aufrechten Gang erwarben und zu findigen Werkzeugmachern wurden.

Genetiker können erkennen, welche unserer Gene sich seit der Abspaltung kaum verändert haben und welche wegen der besonderen Selektionsprozesse beträchtlich anders aussehen als bei den Menschenaffen. Offensichtlich gibt es gerade unter den im Selektionsdruck ▷



Zum raschen Wachstum benötigen Tumoren viel Nahrung und Sauerstoff, die sie über ein dichtes Netz von Blutgefäßen erhalten – wie auf diesem Wachsausguss zu erkennen ist.

PHOTO RESEARCHERS INC. / CLOUDS HILL IMAGING LTD.

Ein ansteckender Hundekrebs

Das Sticker-Sarkom der Hunde überträgt sich unter den Tieren durch Sexualkontakt, auch durch Lecken und Berührung. Nicht Viren werden dabei weitergereicht, sondern abgeschilferte Zellen von Tumoren. Solche Krebsgeschwülste können über faustgroß werden, lassen sich aber meist gut bekämpfen und bilden sich oft auch langsam spontan zurück. Die Tumorzellen ähneln sich genetisch bei Hunden aus der ganzen Welt. Offenbar haben sie alle einen gemeinsamen Ursprung. Nach Meinung der Forscher wurde hier eine Krebszelle – die womöglich sogar von einem Wolf stammte – vor Jahrhunderten zu einem erfolgreichen, weit verbreiteten Parasiten.

CORBIS / ZEFA, DANIEL BOSCHUNG

Vielleicht war es ein Husky, der das Sticker-Sarkom zuerst auf andere Hunde übertrug.

Bisher kennen Wissenschaftler nur ganz wenige Beispiele für ansteckenden Krebs. Dazu gehört ein Gesichtskrebs, an dem Beutelteufel auf Tasmanien eingehen. Die Tiere übertragen die Krankheit bei Beißereien. Dass solche Krebsarten nicht häufiger vorkommen, könnte daran liegen, dass unser Immunsystem fremde Zellen vehement bekämpft, wie auch die Abstoßung von transplantierten Organen zeigt. Entstand diese hochwirksame Immunabwehr fremden Gewebes vor vielen Millionen Jahren etwa sogar als Schutzmaßnahme gegen parasitische Krebsformen?

Irgendwie muss das Sticker-Sarkom im Schutzwall eine Hintertür gefunden haben. Diese Zellen bilden nur ganz wenige jener Oberflächenproteine, an denen das Immunsystem der Wirbeltiere Körpereigenes und Fremdes unterscheidet. Sie erfahren dadurch nicht den großen Sofortangriff, sondern ein Tumor kann zunächst wachsen und wird nur langsam, nach und nach, über Monate zerstört. Sogar danach noch können einzelne Krebszellen überleben. Solch ein Krebs stirbt auch nicht wie sonst mit seinem Wirt, sondern er überdauert unter Umständen Jahrhunderte.

▷ stark veränderten Genen einige, die bei Krebs wichtige Funktionen übernehmen. Diese potenziell gefährlichen Erbanlagen können sich nur deswegen durchgesetzt haben, weil sie in anderer Hinsicht große Vorteile brachten, die letztlich stärker wogen.

Zu diesen hochgradig evolvierten »Krebsgenen« gehört der Erbfaktor für ein wichtiges Enzym der Fettsäurebildung, die Fettsäuresynthase (englisch kurz FAS). Auch gesunde Zellen benötigen dieses Enzym. Die damit hergestellten Moleküle verwenden sie für vielerlei, so für Membranen oder zum Energiespeichern. Krebszellen von Tumoren bilden das FAS allerdings in viel größeren Mengen. Tumorzellen können sogar absterben, wenn es gelingt, das entsprechende Gen abzublocken.

Mary J. O'Connell von der Dublin City University und James O. McInerney von der National University von Irland in Maymooth haben die Sequenzen dieses Gens bei Menschen und anderen Säugetieren verglichen. Offenbar erfuhr der Erbfaktor in der Menschenevolution eine starke Selektion, denn seine Sequenz hat sich im Vergleich zu der unserer Primatenverwandten erheblich verändert.

Die Forscher wissen noch nicht, was das FAS beim Menschen eigentlich anders macht. Sie verweisen aber auf eine Idee, auf die der Psychiater David Horrobin (1939–2003) in den 1990er Jahren stieß. Er glaubte, die gewaltige Zunahme von Größe und Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns sei erst durch neuartige Fettsäuren möglich geworden. Ohne Fettsäuren können Nervenzellen keine Membranen aufbauen und folglich auch keine Verbindungen knüpfen. Ermöglichte unter anderem die Umstellung bei der Fettsäuresynthese etwa unser großes Gehirn, wie McInerney spekuliert? Leider scheinen beim Menschen auch Krebszellen stark von der Neuerung zu profitieren. Sie können das Enzym sogar in eigener Weise nutzen, etwa als zusätzlichen Energielieferanten.

Unter den schnell evolvierenden Krebsgenen gibt es etliche, die im Normalfall in Geweben für die Fortpflanzung wichtig sind, etwa in der Plazenta. Bernard Crespi von der Simon-Fraser-Universität in Burnaby (British Columbia, Kanada) und Kyle Summers von der East Carolina University in Greenville (North Carolina) sehen in vielen solchen Fällen einen Zusammenhang. Zum Bei-

spiel wirken bestimmte in der Plazenta aktive Gene bei Krebs fatal. Und zwar agieren deren Produkte in dem von vielen Forschern postulierten Wettbewerb zwischen Mutter und werdendem Kind um Ressourcen, sprich Nahrungszufuhr.

Gene vom Mutter-Kind-Konflikt

Zwischen beiden Seiten herrscht hierin biologisch gesehen ein grundsätzlicher Interessenkonflikt. Für den Fötus zählt, gut zu wachsen, für die Mutter aber auch, mehr gesunde Kinder zu gebären. Das spiegelt sich in den Erbanlagen wider. Einerseits begünstigt die Selektion Gene, die dem Fötus erlauben, möglichst viele Nährstoffe zu beziehen. Bestimmte Proteine werden eigens zu dem Zweck gebildet, dass fötales Plazentagewebe aggressiv in das mütterliche einwächst. Andererseits unterstützen Ausleseprozesse aber auch Erbanlagen, die der Schwangeren dabei helfen, diesen Zugriff zu begrenzen und so Kraft für weitere Kinder übrig zu behalten. Sozusagen jedes Mal, wenn neue Begrenzungsmechanismen von der Mutterseite her entstehen, begünstigt das auch Mutationen für das Kind, die den Effekt wieder abschwächen.

Krebszellen nun können zur Unzeit Gene anwerfen, deren Proteine eigentlich dafür ausgelesen wurden, die Leistungsfähigkeit der Plazenta zu verbessern. Diese Faktoren sorgen für neue Blutgefäße und ein aggressives Wachstum, was einem Tumor genauso zugutekommt wie im anderen Fall einem Fötus – oder präziser gesagt der Güte der Plazenta. Nach Ansicht der Forscher erscheint es natürlich, dass Krebszelllinien wenn möglich Gene zweckentfremden, die ihnen nützen. Sie ergreifen eben neue Hilfsmittel, wenn sie damit die Oberhand über gesunde Gewebe gewinnen können. Dass sich solche Mutationen trotz des möglichen Missbrauchs etabliert haben, liegt sicherlich daran, dass die Vorteile für den Fötus überwiegen. Crespi sagt es so: »Die betreffende Genvariante wird selektiert, weil das Ungeborene seiner Mama dann ein bisschen mehr abluchsen kann. Wenn dieses Kind 60 Jahre alt ist, trägt es vielleicht ein etwas höheres Krebsrisiko. Aber das zählt eben nicht mehr so.«

Auch die Spermien bildenden Zellen vermehren sich rasch – und anders als bei der Plazenta jahrzehntelang und in Unmengen. Die spezifisch in ihnen angeschalteten Gene erfahren mit die schnellste Evolution im menschlichen Genom. Ein Gen, das die Spermienbildung beschleunigt, wird in mehr Spermien vertreten sein, darum eine Eizelle mit größerer Wahrscheinlichkeit befruchten und folglich in mehr Nachkommen auftreten.

Die Kehrseite ist aber, dass dieselben Gene zur schnelleren Vermehrung von Krebszellen beitragen können. »Gesunde Zellen müssen diese Gene strikt ruhigstellen, denn sie sind hochgefährlich«, kommentiert Andrew Simpson vom Ludwig-Institut für Krebsforschung in New York. Doch offenbar können Krebszellen die Blockade mit geeigneten Mutationen aufheben.

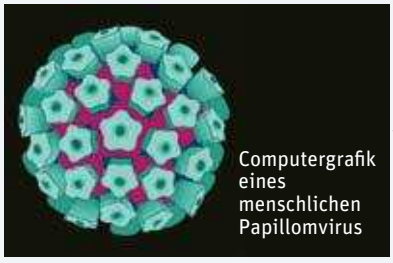
Die Evolutionsbiologen hoffen, dass die Aufklärung von Zusammenhängen dieser Art der medizinischen Krebsforschung hilft. Solche Studien werden vielleicht auch erhellen können, warum Krebszellen so leicht gegen Medikamente resistent werden – eine der schwierigsten Herausforderungen der Krebstherapie.

Oft verlieren bei einer Chemotherapie eingesetzte Wirkstoffe nach einiger Zeit ihre Durchschlagskraft. In vieler Hinsicht ähnelt das dem Geschehen beim Aidserreger HIV. Die Viren verändern sich rasch und können darum schnell neue Resistenzen entwickeln. Genauso können Krebszellen mutieren und Eigenschaften erwerben, die sie gegen ein bestimmtes Chemotherapeutikum weniger empfindlich machen. Im Vergleich zu ihren verletzlicheren Schwestern sind sie nun im Fortpflanzungsvorteil. Bei HIV, aber auch bei anderen Krankheitserregern, hat ▷

Krebsvirus unter Evolutionsdruck

Etwa 17 Prozent der Krebsfälle gehen nach Schätzung der amerikanischen Krebsgesellschaft auf Erreger zurück. Zu den bestuntersuchten davon gehören menschliche Papillomviren (HPV), die für die meisten Fälle von Gebärmutterhalskrebs verantwortlich sind. Diese Virustypen können ihre Wirtszellen zur Vermehrung anregen, wenn andere Zellen damit längst aufhören. Auch verhindern sie die Reparatur von Mutationen der DNA. Um die Evolution und Verbreitung verschiedener Typen dieses Virus aufzuklären, haben Forscher von Hunderten von Typen das Genom sequenziert und verglichen. Die Papillomviren bilden eine große Familie. Sie kommen bei fast allen Wirbeltieren vor und sind oft artspezifisch. Meist erzeugen sie nur Warzen oder andere gutartige Wucherungen. Als der frühe *Homo sapiens* vor 200 000 Jahren in Afrika lebte, war er bereits Wirt von etlichen Stämmen, die nur menschliche Zellen infizieren. Einige davon können Krebs erzeugen.

Bei seiner Verbreitung auf andere Kontinente nahm der *Homo sapiens* jene Viren mit. Nicht nur bei den Menschen entstanden genetisch unterschiedliche Populationen, auch bei den Papillomviren. In gewissem Sinn spiegeln die Virustypen somit Abstammungsverhältnisse von Menschengruppen wider. So tritt beispielsweise die wohl älteste Viruslinie vorwiegend bei Menschen afrikanischer Herkunft auf. Die Indianer – die aus Asien kamen – haben ähnliche Viren wie Asiaten.



Computergrafik eines menschlichen Papillomvirus

PHOTO RESEARCHERS INC. / UNIVERSITY OF CAPE TOWN, LINDA M. STANNARD

Offenbar hat das medizinisch Relevanz. Die unterschiedlichen Virussorten scheinen sich an ihre Wirte angepasst zu haben – nach einer neueren Studie insofern, als sie sich jeweils bei Menschen ihrer angestammten ethnischen Gruppe stärker behaupten, nämlich länger im Wirt halten.

Wie wurden einst gutartige Papillomviren zu Krebserregern? Das besser zu verstehen, ist auch im Zusammenhang mit der neuerdings möglichen – und empfohlenen – Impfung gegen Gebärmutterhalskrebs wichtig. Anscheinend haben Papillomviren gelegentlich einander Gene weitergereicht, die an der Krebsentstehung mitwirken. In Zeiten von Aids könnte dergleichen zunehmen, weil Menschen mit geschwächtem Immunsystem auch Papillomviren weniger gut bekämpfen können. Je leichter mehrere HPV-Typen zusammentreffen, desto mehr steigt die Gefahr, dass ein neues aggressives Papillomvirus entsteht.

▷ ein besseres Verständnis solcher Vorgänge neue Behandlungskonzepte hervorgebracht, sodass die Resistenzgefahr viel geringer wird. Ähnliches erhoffen sich die Wissenschaftler für Krebs.

Für die meisten Krebsforscher sind die hier vorgestellten Konzepte ungewohnt. Einige Fachleute reagieren darauf allerdings begeistert. Simpson etwa hält viel davon, sich mit den missbrauchten spermienspezifischen Genen zu befassen. Für den Kampf gegen Krebs sei es unbedingt notwendig zu verstehen, warum auf diesen Genen ein so starker Auslesedruck liegt. Daran ließe sich viel über Krebs lernen, meint der Forscher.

Auch der Onkologe Bert Vogelstein vom Howard Hughes Medical Institute in Jones Bridge Road (Maryland) hält es für hilfreich, Krebs von der Evolution her zu betrachten. »Das passt ausgezeichnet zu den Vorstellungen der Molekularbiologen. Auf der einen Seite ist Krebs ein Nebenprodukt der Evolution.« Vogelstein ist jedoch auch skeptisch. Was die schnell evolvierenden Krebsgene anginge, müsse man vorsichtig damit sein, welche Bedeutung dem beizumessen sei. »Als Erstes würde ich fragen: Betrachten diese Forscher wirklich das gesamte Genom, und ganz unvoreingenommen?« Solche systematischen Untersuchungen würden bisher fehlen, räumt McInerney ein. Immerhin hätten die bisherigen Erkenntnisse ihn und andere Forscher bereits veranlasst, mit derartigen Studien anzufangen.

Doch es gibt auch Krebsexperten, die den Evolutionsansatz kritischer sehen. Der Onkologe und Alternsforscher Christopher Benz vom Buck-Institut für Alternsforschung in Novato (Kanada) möchte Ergebnisse dieser Richtung erst dann akzeptieren, wenn sie experimentell überprüft wurden. Crespi kennt diesen Standpunkt gut. Nach seiner Ansicht rührt die Skepsis des anderen Lagers auch daher, dass Evolutionsbiologen und Krebsforscher bei ihrer wissenschaftlichen Arbeit anders geartete Fragen stellen. »Krebsforscher fragen wie, Evolutionsforscher warum.«

Vielleicht wird der Evolutionsansatz gerade deswegen manche Diskussionen der Krebsexperten bereichern. So ist seit Langem strittig, ob Mäuse gute Tiermodelle für menschlichen Krebs abgeben. Einige Evolutionsbiologen verweisen auf die lange, völlig andere Entwicklungsgeschichte seit ungefähr 100 Millionen Jahren. Zwar gibt es eine gemeinsame genetische Basis bei Nagern und Primaten, doch viele der Erbanlagen haben sich inzwischen auf unterschiedliche Weise verändert. Speziell was die Hominiden betrifft, wurden allein in den letzten paar Millionen Jahren entscheidende Gene stark abgewandelt – so das oben erwähnte Fettsäuresyntheseenzym FAS.

Speziell die Fortpflanzung folgt bei Mäusen einer anderen Strategie. Die Nager sind daran angepasst, möglichst schnell und früh möglichst viele Junge zu bekommen. Diesen Trend hat der Mensch bei der Labormaus durch Züchtung nochmals deutlich verstärkt. Damit, dass rasches Heranwachsen und frühe Fortpflanzung begünstigt wurden, könnten aber auch Krebsabwehrmechanismen weggezüchtet worden sein, die Wildmäuse besitzen. »Wir haben ihr Fortpflanzungsalter beeinflusst und damit den Lebensverlauf«, meint Crespi.

Vielleicht erfahren wir mit dem evolutionsbiologischen Ansatz eines Tages, warum es so schwer ist, den Krebs zum Verschwinden zu bringen. Jarle Breivik kommentiert: »Eine echte, endgültige Lösung kann es nicht geben. Letztlich ist Krebs eine Folge unserer Biologie. Wir sind nun einmal vergängliche Zellkolonien – von unseren Genen hervorgebracht, sodass sie selbst in die nächste Generation gelangen. Höchstens wenn wir uns völlig anders fortpflanzen würden, könnten wir dem Krebs vielleicht den Garaus machen.« ◁

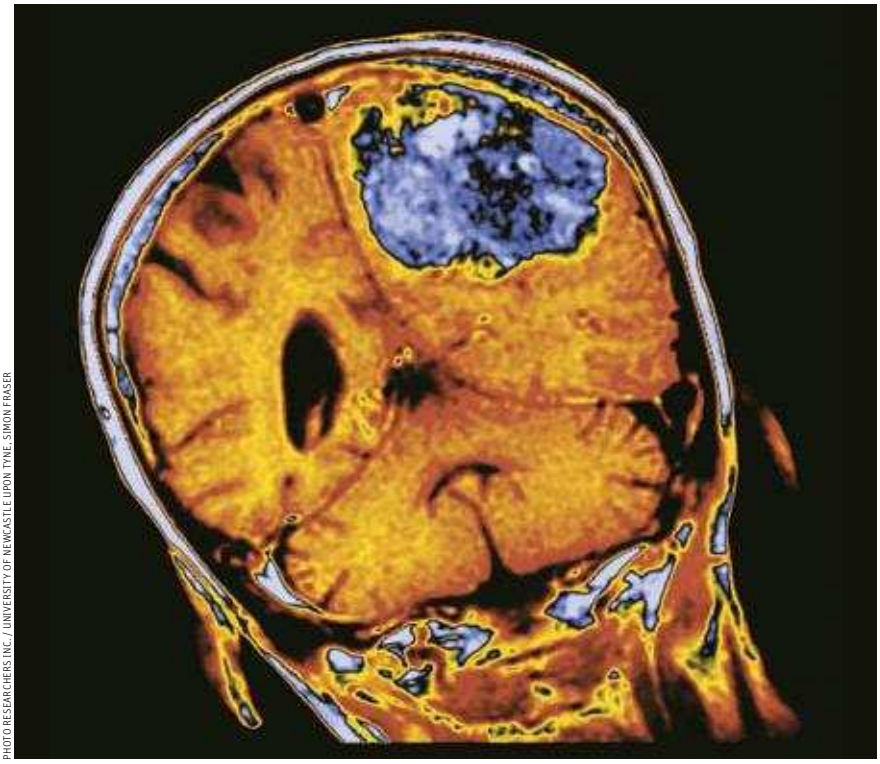


PHOTO RESEARCHERS INC. / UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE, SIMON FRASER

Krebszellen können sich wegen ihrer genetischen Eigenschaften gegenüber normalen Körperzellen durchsetzen – wie dieser Hirntumor (blau markiert).

Carl Zimmer hat für große amerikanische Zeitungen und Magazine schon oft Artikel zu Evolutionsthemen verfasst. Bei Spektrum der Wissenschaft erschien »Die Neurobiologie des Selbst« (SdW 5/2006; Dossier 3/2007). Zimmer schrieb mehrere Bücher, unter anderem über Bio- und Medizinthemen. Sein Blog »The Loom« (www.scienceblogs.com/loom) gewann den Webpreis von Scientific American für Wissenschaft und Technologie.

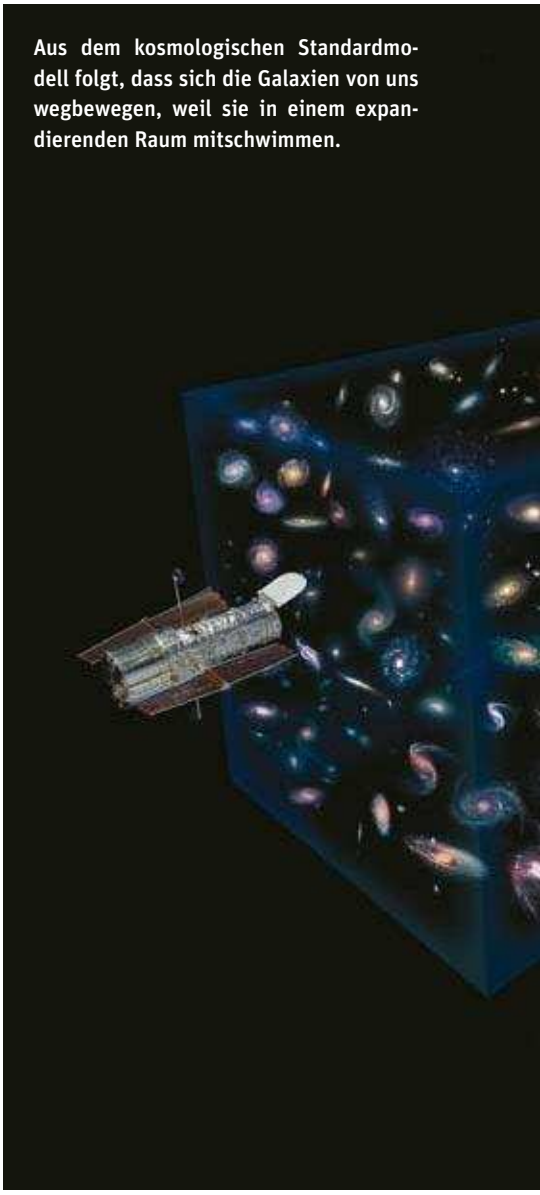
AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Positive selection in the evolution of cancer. Von Bernard J. Crespi und Kyle Summers in: Biological Reviews, Bd. 81, S. 407, 2006

Ageing: Balancing regeneration and cancer. Von Christian M. Beausejour und Judith Campisi in: Nature, Bd. 443, S. 404, 28. Sept. 2006

Evolutionary biology of cancer. Von Bernard J. Crespi und Kyle Summers in: Trends in Ecology and Evolution, Bd. 20, S. 545, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/896271.



Aus dem kosmologischen Standardmodell folgt, dass sich die Galaxien von uns wegbewegen, weil sie in einem expandierenden Raum mitschwimmen.

Und es expandiert doch!

Ein Merkmal des Standardmodells der Kosmologie bewegt noch immer die Gemüter: Wird die »Galaxienflucht« durch die Expansion des Raums verursacht – oder handelt es sich um eine echte Fluchtbewegung der Welteninseln?

Von Marek Abramowicz und Stanislaw Bajtlik

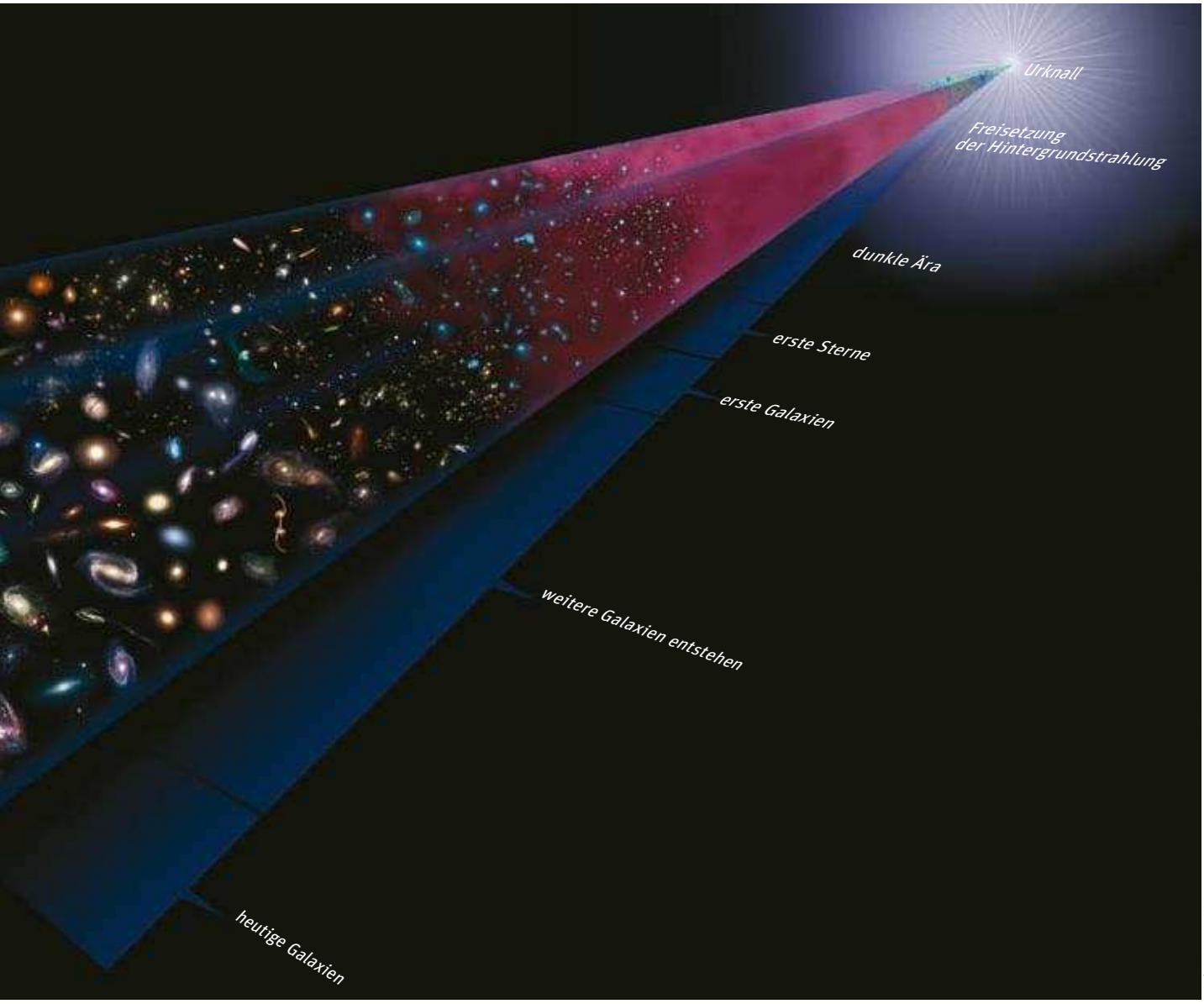
Eine der größten Errungenschaften der Menschheit ist die Erkenntnis, dass das Universum vor endlicher Zeit entstand und sich seitdem entwickelt. Sie wird gewöhnlich im Rahmen des Urknallmodells formuliert, das auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie aufbaut. Dieses Modell macht drei ungewöhnliche Aussagen.

Die erste besagt, dass das Universum aus einem heißen Urzustand hervorging, in dem sich die Materie im thermischen Gleichgewicht mit der Strahlung befand. Als die Dichte des Alls so weit absank, dass sich aus den Ionen des Plasmas elektrisch neutrale Atome bilden konnten (»Rekombination«), entkoppelte sich Strahlung von der Materie. Von diesem Ereignis, das sich etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall ereignete, kündet die kosmische Hintergrundstrahlung, die ziemlich gleichmäßig den ganzen Raum erfüllt.

Diese Strahlung ist physikalisch durch das thermische Gleichgewicht festgelegt. Damit lässt sich ihr Spektrum durch eine so genannte Planck'sche Strahlungskurve beschreiben, deren Form außer Naturkonstanten nur von der Temperatur abhängt. Im Verlauf der Geschichte des Kosmos ist die Temperatur der Hintergrundstrahlung stetig gesunken.

Entdeckt wurde die Hintergrundstrahlung 1965 durch Arno Penzias und Robert Wilson von den Bell-Laboratorien in Crawford Hill (New Jersey). Sie hatten gemessen, dass die Temperatur der Strahlung etwa 3 Kelvin beträgt, heute wird sie genauer mit 2,725 Kelvin angegeben.

Messungen des Satelliten Cobe (Cosmic Background Explorer) ergaben 1992, dass die Hintergrundstrahlung winzige Fluktuationen aufweist. Diese Schwankungen im Temperaturprofil, über die gesamte Himmelskugel betrachtet, bilden die Dichteschwankungen zur Zeit der Rekombination ab, dem Zeitpunkt, als der Kosmos für Strahlung durchsichtig wurde.



NASA / ESA UND ANN FEILD

Die zweite ungewöhnliche Aussage lautet: 99 Prozent der Atome des Universums bestehen aus Isotopen von Wasserstoff und Helium. Das war bereits vor dem Standardmodell des Urknalls bekannt. Bewiesen wurde diese Tatsache von Cecilia Payne-Gaposchkin von der Harvard-Universität in den 1920er Jahren. Die in England geborene Astronomin konnte mit Hilfe spektroskopischer Beobachtungen zeigen, dass Sterne vor allem aus Wasserstoff bestehen.

Ein Raum, der sich ausdehnt

Die dritte Aussage erstaunte selbst Einstein, zumal sie nicht von ihm selbst stammte. Aus den Gleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie folgerte der russische Mathematiker Alexander Friedmann bereits in den 1920er Jahren, dass das Universum entweder expandieren oder in sich zusammenfallen sollte. Diese Expansion beziehungsweise Kontraktion betrifft den ganzen Raum. Anfänglich hatte Einstein selbst nach Lösungen der Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie gesucht, für die das Universum statisch ist, in denen sich der Raum also nicht verändert. Er bemerkte, dass eine solche Lösung nur existiert, wenn man in die Gleichungen einen Zusatzterm einführt, die so genannte kosmologische Konstante, die er bald wieder verwarf.

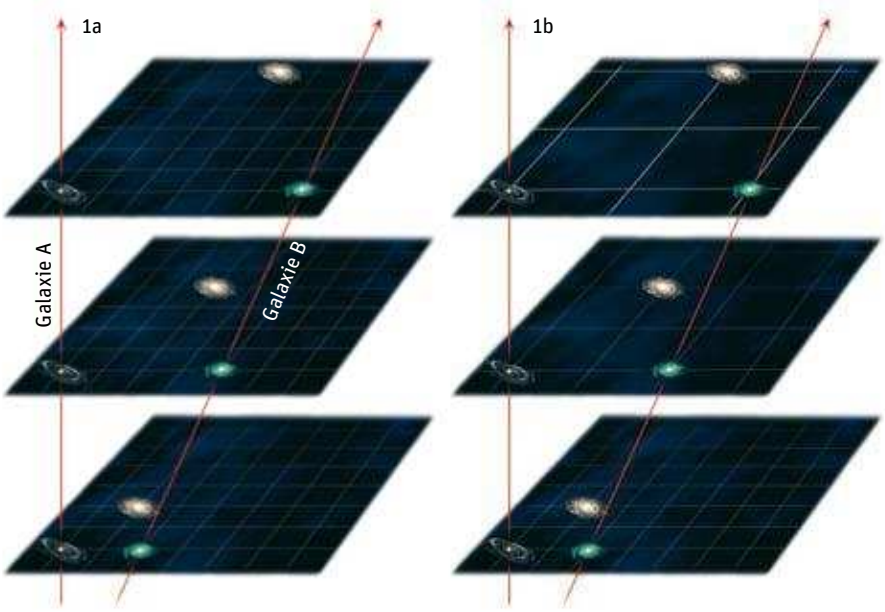
Die Annahme, dass das Universum schrumpft oder expandiert, widerspricht der Vorstellung eines statischen Raums, die Gelehrte wie Aristoteles und Newton teilten. Die Verknüpfung zwischen Materie und Raum kann man sich als eine Art Schwimmen der Materie im Raum vorstellen. Viele Menschen erwarten intuitiv, der Raum sei unendlich groß und bilde ein unveränderliches Volumen, in dem die Strahlung und Materie des Universums enthalten sind. Daher ist es nicht verwunderlich, dass selbst bekannte Wissenschaftler die Entdeckungen von Erwin Hubble aus den 1920er Jahren nicht sofort akzeptierten.

Hubble, der am Mount-Wilson-Observatorium in Pasadena (Kalifornien) arbeitete, hatte die Entfernungen mehrerer Galaxien gemessen und seine Ergeb- ▷

▷ nisse mit spektroskopischen Beobachtungen derselben Objekte in Verbindung gebracht, die Vesto Slipher mit den Teleskopen des Lowell-Observatoriums in Flagstaff (Arizona) aufgenommen hatte. Slipher war aufgefallen, dass die Spektrallinien im Licht ferner Galaxien systematisch zu längeren Wellenlängen hin verschoben waren. Hubble konnte zeigen, dass dies umso stärker der Fall war, je weiter entfernt sie schienen. Das konnte nur bedeuten: Die Galaxien bewegen sich im Mittel von uns weg, der Raum scheint zu expandieren.

Die Verschiebung der Spektrallinien der Galaxien in den langwelligen Bereich des Spektrums, die so genannte Rotverschiebung, wird seither als eine kosmische »Fluchtbewegung« der Galaxien gedeutet. In den relativistischen Weltmodellen von Friedmann und anderen wird sie durch die Expansion des Kosmos relativ zu einem (fiktiv angenommenen) statischen Raum erzeugt.

Diese Deutung stieß bald auf Widerspruch: So behauptete in den 1930er Jahren der Mathematiker und Astrophysiker Edward Arthur Milne (1896–1950) von der Universität Oxford, dass man mittels Beobachtungen grundsätzlich nicht feststellen könne, ob die Rotverschiebung der Spektrallinien durch das Mitschwimmen der Galaxien in einem expandierenden Raum verursacht werde oder durch den kinematischen Dopplereffekt.



Der kinematische Dopplereffekt berücksichtigt die Rotverschiebung der Spektrallinien auf Grund der Bewegung des Beobachters im statischen Raum. Um die Rotverschiebung der Galaxien auf diese Weise zu erklären, entwarf Milne ein alternatives, kinematisches Modell der Kosmologie.

Zwar spricht die Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung eindeutig gegen diese Vorstellung und für das relativistische Urknallmodell, wonach der Raum eben nicht statisch, sondern veränderlich ist. Doch bis heute rätseln viele Menschen darüber, warum man die Expansion des Raums nicht durch eine Bewegung der Galaxien im statischen Raum ersetzen und entsprechend die Rotverschiebung der Spektrallinien als Dopplereffekt interpretieren kann (siehe SdW 5/2005, S. 38).

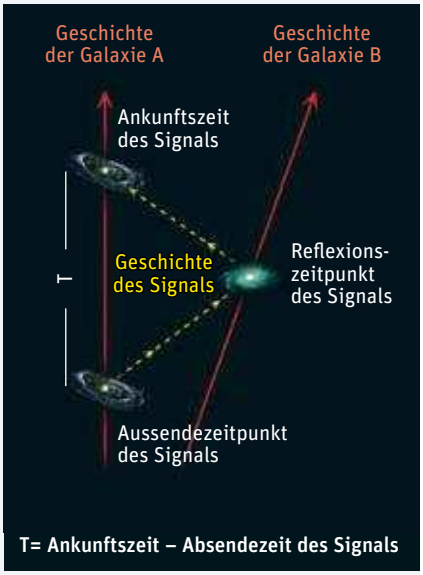
Eine falsche Vorstellung von der Definition kosmischer Abstände erweist sich dabei als entscheidende Hürde. Das, was wir Raum nennen, ist nämlich nicht ein objektives Element der Realität, sondern hängt vom jeweiligen Beobachter ab. Aus dem gleichen Grund hat man ein Problem mit bestimmten Geschwindigkeiten. Und genau darum geht es: die Beziehung zwischen den Schlüsselgrößen Abstand, Geschwindigkeit und Rotverschiebung. Kann es sein, dass Milne Recht hatte und es unmöglich ist zu entscheiden, welches der oben erwähnten Szenarien zutrifft?

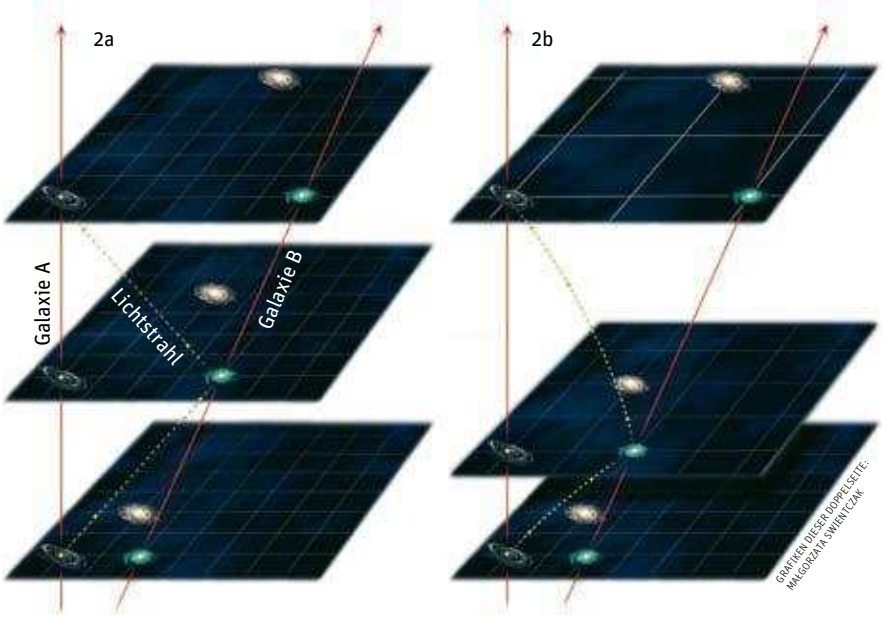
Wir beschlossen, zusammen mit Jean-Pierre Lasota vom Institut für Astrophysik Paris sowie Audrey Moudens von der Universität Paris Süd, dies zu überprüfen. Das bedurfte gewisser Hilfsmittel. So führten wir den »Radarabstand« ein, der dadurch bestimmt wird, dass man einen Lichtstrahl in die Richtung einer gegebenen Galaxie aussendet und dann die Zeit misst, bis der reflektierte Strahl wieder eintrifft (siehe Grafik links). Dieses Entfernungsmaß ist unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der sich die Galaxie bezüglich eines beliebigen Beobachters bewegt, weil ein Radarsignal sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und diese für jeden Beobachter immer den gleichen Wert hat.

Unsere Rechnungen beweisen, dass Milnes Theorie falsch ist (siehe Grafik 1

Bestimmung kosmischer Abstände

Ein Lichtstrahl, den ein Beobachter in Galaxie A abschickt, wird von der Galaxie B reflektiert und kehrt zum Beobachter in Galaxie A zurück. Der Beobachter misst die Zeitspanne zwischen dem Moment, an dem er das Signal abgeschickt hat, und dessen Rückkehr. Der so genannte **Radarabstand** ist das Produkt aus der Hälfte dieses Zeitintervalls T und der Lichtgeschwindigkeit. Man nimmt die Hälfte des Zeitintervalls, weil das Licht die Strecke zwischen den Galaxien ja zweimal zurücklegt– von A nach B und von B nach A. Man sollte beachten, dass es im expandierenden Kosmos eines sich aufblähenden Raums keine Symmetrie zwischen den Wegen AB und BA gibt; aber das Prinzip der Messung bleibt unverändert.





Dass die Galaxien im statischen, sich nicht verändernden Raum auseinanderlaufen, soll durch das gleich bleibende Netz symbolisiert werden (1a, 2a). In dieser Art beschrieb Edward A. Milne die Expansion des Weltalls. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie schwimmen die Galaxien im expandierenden Raum, was hier durch ein Netz dargestellt ist, das sich ausdehnt (1b, 2b). Viele Missverständnisse in der Kosmologie beruhen auf der Gleichsetzung dieser beiden Denkmodelle. Grafik 2 zeigt die Geschichte eines Lichtstrahls, der den Radarabstand zwischen den Galaxien in einer statischen Raumzeit (2a) und im expandierenden Raum (2b) ausmisst. Infolge der verschiedenen Trajektorien des Lichtstrahls registrieren die Beobachter in den entsprechenden Situationen jeweils unterschiedliche Rotverschiebungen. Der Beobachter befindet sich in allen Abbildungen in der Galaxie A, die auf der senkrechten roten Achse liegt.

und 2 oben). Beobachtbar sind allein die in den Grafiken mit roten Linen dargestellten Bewegungsgeschichten der Galaxien: ihre Trajektorien in der vierdimensionalen Raumzeit. Das, was wir Raum nennen, ist selbst nicht beobachtbar. Vermeintlich unterscheidet sich das Auseinanderlaufen der Galaxien im statischen Raum (Grafik 1a und 2a) nicht vom Schwimmen im expandierenden Raum (Grafik 1b und 2b).

Die Antwort der Mathematik

In Wahrheit ist ihr Verlauf aber nicht identisch, weil sich das Licht in den beiden Szenarios unterschiedlich ausbreitet (fachlich gesprochen: Der Lichtkegel hat im expandierenden Raum eine andere Struktur als im statischen). Wir konnten zeigen, dass die vierdimensionale Raumzeit des expandierenden Raums gekrümmt sein muss, selbst wenn der dreidimensionale Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt flach ist.

Das hat zur Folge, dass das Lichtsignal im statischen Raum von der Zielgalaxie B zu einem anderen Moment reflektiert wird als im expandierenden Raum, sogar dann, wenn der Radarabstand zwischen den Galaxien A und B in beiden Fällen gleich ist. Da der gemessene Wert der Rotverschiebung vom Augenblick abhängt, zu dem das Signal reflektiert wird, ist dieser im statischen Raum ein anderer als im expandierenden. Also werden die Spektrallinien von Galaxien, selbst wenn sie den gleichen Abstand zum Beobachter haben, in den beiden Fällen unterschiedlich rot verschoben sein.

Anhänger des unbewegten Raums würden nun vielleicht einwenden: Gut, die Geschwindigkeiten der betrachteten Galaxien könnten aber irgendwie vom Abstand des Beobachters abhängen, sodass die beiden Situationen dennoch ununterscheidbar blieben. Unsere Antwort: Das stimmt auch – aber nur für einen einzigen Augenblick in der Geschichte des Kosmos!

In beiden Räumen stellen wir zwei Funktionen auf, die beschreiben, wie Geschwindigkeit und Rotverschiebung vom Abstand des Beobachters abhängen. In einem bestimmten Moment beschreibt man sie nun in der Art, dass man Geschwindigkeit und Rotverschiebung jeder Galaxie im expandierenden und statischen Raum gleichsetzt. Beide Funktionen hängen jedoch von der Zeit ab. Gleich nach dieser Gleichsetzung weichen sie voneinander ab. Es ist nicht möglich, sie so aufeinander abzustimmen, dass sie immer und überall miteinander übereinstimmen.

Es ist also prinzipiell möglich, die beobachtete Expansion des Raums von Fluchtbewegungen der Galaxien in einem unveränderlichen, statischen Raum zu unterscheiden. Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie als Grundlage hat das Modell des expandierenden Kosmos zahlreiche Erfolge und wurde durch viele weitere Beobachtungen bestätigt. Hoffen wir nun, dass das Expansionsmodell des Kosmos allgemein anerkannt wird, ebenso die letzte der drei Aussagen. Edward A. Milne hatte eine interessante Idee, er behielt aber nicht Recht – die Welt expandiert doch! ◁

Marek Abramowicz und **Stanislaw Bajtlik** sind Astrophysiker. Abramowicz arbeitet an der Universität Göteborg in Schweden sowie am Astronomischen Zentrum Nikolaus Kopernikus in Warschau (CAMK). Er beschäftigt sich hauptsächlich mit Schwarzen Löchern (und gelegentlich mit Kosmologie). Bajtlik arbeitet ebenfalls am CAMK und beschäftigt sich mit Kosmologie (und gelegentlich mit Schwarzen Löchern). Er ist auch Autor von populärwissenschaftlichen Büchern sowie Leiter des polnischen Fernsehprogramms »Simulator faktu« (Faktensimulator).

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Allgemeine Relativitätstheorie. Von Torsten Fließbach. Spektrum Akademischer Verlag 1998 (3. Aufl.)

Cosmology and controversy: The historical development of two theories of the universe. Von Helge Kragh. Princeton University Press 1999

Kinematic relativity. Von E. A. Milne. Clarendon Press 1948

Relativity, gravitation and world structure. Von E. A. Milne. Clarendon Press 1935

ZOOLOGIE

Die phänomenale Welt der Bienen

Das Allerweltsinsekt bietet nach wie vor Unerforschtes – und Gelegenheiten zum Staunen.

Von jeher ist der Mensch von den fleißigen Bienen und ihrer Lebensweise fasziniert. Wenig verwunderlich also, dass die Europäische Honigbiene heute zu den bestuntersuchten Tierarten überhaupt gehört. Mit allen Mitteln rücken ihr die Wissenschaftler zu Leibe: Sie markieren sie mit Mikrochips, beobachten sie mit Kameras, belauschen sie mit Mikrofonen und Vibrationsmessgeräten und entschlüsseln ihr Genom, um hinter ihre Geheimnisse zu kommen. Das Wissen über die kleinen, emsigen Insekten wächst von Tag zu Tag – und wirft dennoch immer wieder neue Fragen auf.

Jürgen Tautz, Professor an der Universität Würzburg und Vorsitzender der BEEgroup (eines Vereins, der sich der Erforschung der Honigbiene verschrieben hat), hat mit viel Begeisterung eine Zusammenfassung des derzeitigen Wissensstands geschrieben. Das Werk wirkt niemals trocken oder dozierend, nicht zuletzt auch dank der herrlichen Bilder der Fotografin Helga Heilmann, die geradezu intime Einblicke in das Leben der Honigbienen gewähren. Fachleute werden in diesem Buch wohl kaum etwas Neues finden. Doch alle Naturfreunde, die schon immer wissen wollten, »wie es die Bienen tun«, kommen voll auf ihre Kosten.

In zehn klar strukturierten Kapiteln beschreibt Tautz das Leben der einzelnen Tiere und des gesamten Bienenstaats: wie aus den Eiern die Larven und schließlich die Bienen schlüpfen, welche Aufgaben jedes Tier im Lauf seines Lebens zu erlernen und zu bewältigen hat, welche ungeheuren Leistungen einzelne Individuen und ein gesamter Bienenstaat vollbringen – dies und vieles mehr wird hier erklärt. Der Autor geizt nicht mit beeindruckenden Zahlen und Hochrechnungen. So kann eine Sammelbiene an einem guten Tag Dutzende von Kilometern fliegen und weit über tausend Blüten besuchen; ein Bienenvolk produziert im Jahr mehrere hundert Kilogramm Honig und sammelt an die 30 Kilogramm Pollen; die Arbeitsbienen eines Volks erzeugen nach Bezug einer neuen Wohnhöhle in einer Saison genug Wachs für den Bau von 100 000 neuen Wabenzellen.

Überhaupt lassen die Bienen so manch anderes Tier (den Menschen eingeschlossen) schnell blass aussehen, betrachtet man die zahlreichen Fähigkeiten, die eine Biene im Lauf ihres kurzen Lebens entwickelt. Das Geheimnis der Honigbienen und ihrer Leistungen beruht auf ihrer – im Tierreich ansonsten nur sehr selten anzutreffenden – Lebensweise als große Gruppe von Tausenden von Individuen. Tautz und andere Wissenschaftler bezeichnen den Bienenstaat gerne als »Superorganismus«, der sich von einigen seiner Eigenschaften her durchaus mit einem Säugetierorganismus vergleichen lässt: Wie die Zellen eines Körpers betreiben die Individuen des Bienenstaats Arbeitsteilung; wie ein Säugetierorganismus kann auch ein Bienenvolk innerhalb seines Stocks (die Waben versteht Tautz als Bestandteil des Volks, da sie reine Bienenprodukte sind) die Temperatur entsprechend den Außenwerten regulieren; und so wie im Säugetierkörper nur einige bestimmte Zellen der Fortpflanzung dienen, so sind bei den Bienen nur ganz wenige Individuen für diese Aufgabe zuständig, nämlich die Königinnen und die Drohnen.

Tautz treibt diesen Vergleich noch ein bisschen weiter und bringt die Bienen und ihre Lebensweise immer wieder mit der modernen menschlichen Technik in Verbindung. So produzieren Ammenbienen »Designerfood« für die Brut, und die Waben dienen dank ihrer Fähigkeit zur Vibrationsübertragung als »Telefonfestnetz« des Volks oder gar als »comb-wide web«. Solche Vermenschlichungen sind nicht wirklich sinnvoll, doch Unterhaltungswert haben sie allemal. Schließlich ist die »Schwarmintelligenz«, die durch komplexe Wechselwirkungen zwischen den einzelnen, begrenzten Individuen viel mehr leistet als die Summe ihrer Teile, ein fantastisches Vorbild für die künstliche Intelligenz der Roboter und Computer. Für die bionische Forschung (vom Autor auch scherzhaft »BEEonik« genannt) bieten die Honigbienen also ein unglaublich weites und bisher nur in Ansätzen erforschtes Feld.

Niemand wird sich nach der Lektüre dieses herrlichen Buchs dem Charme der emsigen Nektarsammler entziehen können. Lesen, staunen – und dabei genussvoll ein Honigbrot verzehren!

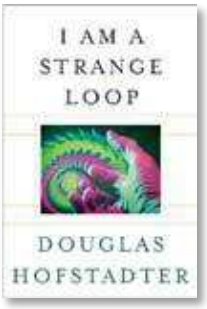
Christine Scholtyssek

Die Rezensentin hat ihre Diplomarbeit über den Schwänzeltanz der Honigbiene geschrieben und ist freie Autorin in Ubstadt-Weiher (Baden).

Wo Bienen neue Waben anlegen oder defekte ausbessern, bilden sie Bauketten. Ihre Funktion ist unklar.

Jürgen Tautz
Phänomen Honigbiene
Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2007. 278 Seiten, € 24,95

Können *strange loops* das Bewusstsein erklären?



Douglas R. Hofstadter will die Botschaft seines Kultbuchs »Gödel, Escher, Bach« noch einmal vermitteln – 25 Jahre danach.

Unser Gehirn enthält einige hundert Milliarden Neuronen mit zehntausendmal so vielen Verbindungen zwischen ihnen. Durch welch unglaubliche Zauberei wird dieses Gewirr von Fäden seiner selbst bewusst, fähig, Liebe und Hass zu empfinden, Romane und Sinfonien zu schreiben, Lust und Schmerz zu fühlen und sich aus freiem Willen für Gut oder Böse zu entscheiden?

Der australische Philosoph David Chalmers hat die Erklärung des Bewusstseins »das schwere Problem« genannt. Das leichte Problem ist, Unbewusstes wie Atmen, Verdauen, Gehen, Wahrnehmen und tausend andere Dinge zu verstehen. An dem schweren beißen sich Philosophen, Psychologen und Neurowissenschaftler zurzeit bevorzugt die Zähne aus und produzieren tausende Bücher.

Ein aktuelles stammt von Douglas R. Hofstadter, Professor für Kognitionswissenschaft an der Universität von Indiana in Bloomington, der vor allem durch sein preisgekröntes Buch »Gödel, Escher, Bach« bekannt geworden ist. Sein neues Werk, so genial und provokant wie seine Vorgänger, ist eine bunte Mischung aus Spekulationen und Geschichten aus seinem Leben.

Ein ganzes Kapitel ist einer persönlichen Tragödie gewidmet, die Hofstadter bis heute zu verarbeiten versucht: Im Dezember 1993 starb seine Frau Carol im Alter von 42 Jahren plötzlich an einem Hirntumor. In der Vorstellung von einem Leben nach dem Tod kann er keinen Trost finden; so bleibt ihm nur die Gewissheit, dass Carol in den Erinnerungen derer, die sie kannten und liebten, weiterleben wird – zumindest für eine gewisse Zeit.

Das Buch ist voll von glücklichen Erinnerungen – und weniger glücklichen. Als er als Fünfzehnjähriger aufgefordert wurde, zwei Meerschweinchen auszuwählen, die für ein Laborexperiment getötet werden sollten, erlitt er einen Schwächeanfall. Seine heftige Abneigung gegen das Töten von Tieren machte ihn zum Vegetarier und später sogar zum Veganer, der nicht nur auf alle Nahrung tierischen Ursprungs verzichtet, sondern auch auf das Tragen von Lederschuhen und -gürteln. Wie sein großes Vorbild Albert Schweitzer leidet er unter Schuldgefühlen, wenn er eine Fliege klatscht.

Auf vielen Seiten kommt Hofstadters große Liebe zur Musik zum Ausdruck. Er ist ein klassischer Pianist; seine Lieblingskomponisten sind Bach, Chopin und Prokofiew, während er Bartok nicht mag. Seine Liebe zur Poesie geht so weit, dass er, neben anderen Werken, Alexander Puschkins (1799–1837) großes Versepos »Eugen Onegin« aus dem Russischen ins Englische übersetzte.

Ein im Buch abgedrucktes, pfiffiges Gedicht einer begeisterten Zuhörerin besingt ein Erlebnis, dem Hofstadter symbolische Bedeutung zuweist. Als er eines Tages einen Packen Briefumschläge anfasst, staunt er über die kleine Murmel, die in der Mitte eingeklemmt zu sein scheint. Es ist aber keine Murmel, sondern nur die Stelle, an der wegen der dort zusammentreffenden Papierlagen der Stapel dicker ist. In ähnlicher Weise, sagt Hofstadter, glauben wir unser Ich eingeklemmt zwischen den Neuronen unseres Gehirns wahrzunehmen.

Die Murmel liefert das Hauptthema des Buchs. Die Seele, das Ich, ist eine Illusion. Es ist eine »seltsame Schleife« *(a strange loop)*, die ihrerseits von einer Unzahl von Schleifen auf einem niedrigeren Niveau erzeugt wird. So kommt es, dass der Klumpen Materie innerhalb unseres Schädels nicht nur sich selbst beobachtet, sondern sich dessen auch bewusst ist.

Seltsame, genauer: selbstbezügliche Schleifen faszinieren Hofstadter seit jeher. Er sieht sie überall. Sie sind das Herzstück von Gödels berühmtem Unbeweisbarkeitssatz. Sie lauern in den »Principia Mathematica« von Russell und Whitehead, stets bereit, die Fundamente der Mathematik zu untergraben. Ihre kürzeste Form sind logische Paradoxa wie »Dieser Satz ist falsch« oder die Karte, auf deren einer Seite steht »Der Satz auf der Rückseite ist wahr« und auf der anderen »Der Satz auf der Rückseite ist falsch«.

In Kapitel 21 führt er ein verstörendes Gedankenexperiment ein, das auch Thema zahlreicher Sciencefiction-Geschichten ist: Ein Mann wird, wie in »Raumschiff Enterprise«, auf einen fremden Planeten und zurück gebeamt, indem eine Maschine ihn Molekül für Molekül abscannt und die Information an den Zielort übermittelt, wo sie zur Herstellung einer exakten Kopie dieses Menschen dient. Wenn dabei das Original zerstört wird, entsteht kein philosophisches Problem. Wenn es aber erhalten bleibt – oder mit derselben Information zwei Kopien hergestellt werden –, entsteht ein Paar identischer Zwillinge mit identischen Erinnerungen. Ist der so gebeamte Mensch derselbe wie das Original oder ein anderer?

Gewisse Themen können Hofstadters Zorn erregen, zum Beispiel die Diskussion über das so genannte *inverted spectrum paradox*. Wie kann ich sicher sein, dass ein anderer Mensch das, was ich als Rot erlebe, genauso erlebt wie ich und nicht etwa eine Empfindung hat, die ich als Blau bezeichnen würde? Oder das Konzept vom Zombie, einem Wesen, das sich in jeder Hinsicht so verhält wie ein gewöhnlicher Mensch, dem aber alle menschlichen Gefühle fehlen.

Eine Videokamera ist auf den Bildschirm gerichtet, der das von ihr aufgenommene Bild zeigt. Dieser *loop* ist nicht wirklich *strange*; immerhin liefert er – im Prinzip – unendlich viele Kopien der Hand zwischen Kamera und Bildschirm.

Oder Bewusstsein und freier Wille. Hofstadter hält beides für Illusionen, für Trugbilder gleich der Murmel im Briefumschlagstapel, allerdings für unvermeidbare, machtvolle Trugbilder. Wir erleben, dass ein Ich in unserem Schädel steckt, aber das ist nur eine Illusion, die von Millionen kleiner Schleifen erzeugt wird, »einem Schwarm bunter Schmetterlinge in einem Obstgarten«. ▷

▷ An dieser Stelle ist Hofstadter anderer Meinung als sein Freund, der Philosoph Daniel C. Dennett (mit dem zusammen er das Buch »The Mind's I«, deutsch »Einsicht ins Ich«, herausgegeben hat). Aber wie Dennett, der einem seiner Werke den dreisten Titel »Consciousness Explained« gab, glaubt er, er habe das Bewusstsein erklärt. Das stimmt leider nicht. Beide haben das Bewusstsein nur beschrieben. Einen Regenbogen zu beschreiben ist einfach, ihn zu erklären ist nicht so einfach. Bewusstsein zu beschreiben ist einfach, aber das Wunder zu erklären, durch das ein Haufen Moleküle es hervorbringt, ist nicht so einfach.

Ich will meine Karten auf den Tisch legen. Ich gehöre zu der kleinen Gruppe der »Mysterianer«, zu denen auch die Philosophen John R. Searle (der Schurke in Hofstadters Buch), Thomas Nagel, Colin McGinn und Jerry Fodor sowie der Linguist Noam Chomsky, der Mathematiker Roger Penrose und einige andere zählen. Wir sind der Überzeugung, dass kein heute lebender Philosoph oder Naturwissenschaftler auch nur die nebelhafteste Ahnung davon hat, wie Bewusstsein und sein unzertrennlicher Begleiter, der freie Wille, aus einem materiellen Gehirn entstehen (was sie zweifellos tun). Wir sind überzeugt, dass kein Computer, wie wir ihn heute kennen – das heißt, der aus Schaltern und Verbindungsdrähten gebaut ist –, je ein Bewusstsein dessen erlangen wird, was er tut. Das stärkste Schachprogramm wird nicht wissen, dass es Schach spielt, ebenso wenig wie eine Waschmaschine weiß, dass sie Wäsche wäscht.

Einige wenige Mysterianer glauben, dass die Wissenschaft eines glorreichen Tages das Rätsel des Bewusstseins lüften wird. Penrose zum Beispiel ist davon überzeugt, dass das Mysterium einem tieferen Verständnis der Quantenmechanik weichen wird. Ich selbst gehöre zu einer radikaleren Fraktion. Wir halten es für den Gipfel der Selbstüberschätzung zu glauben, unser Gehirn sei der unübertreffliche Gipfel der Denkfähigkeit. Mit Sicherheit gibt es Wahrheiten, die unsere intellektuellen Fähigkeiten ebenso weit übersteigen wie unsere Weisheiten die intellektuellen Fähigkeiten einer Kuh.

Warum hat das Universum eine mathematische Struktur? Warum gibt es sich, wie Stephen Hawking es ausdrückte, überhaupt die Mühe, zu existieren? Warum gibt es etwas und nicht nichts? Wie bringen die Schmetterlinge in unserem Hirn die seltsamen Schleifen des Bewusstseins zu Stande?

Vielleicht kennen höherentwickelte Lebensformen in der Andromeda-Galaxie die Antworten. Ich kenne sie sicher nicht. Hofstadter und Dennett kennen sie nicht. Und Sie, verehrter Leser, auch nicht.

Martin Gardner

Der Rezensent hat 25 Jahre lang die Kolumne »Mathematical Games« im Scientific American (»Mathematische Spielereien« in Spektrum der Wissenschaft) geschrieben; sein unmittelbarer Nachfolger, mit dem Kolumnentitel »Metamagical Themas« (»Metamagikum«) war Douglas R. Hofstadter. Gardner, 92, lebt in Norman (Oklahoma). Dieser Text ist eine gekürzte Fassung seiner Rezension »Do Loops Explain Consciousness?« aus den Notices of the American Mathematical Society (AMS), Bd. 54 (2007), Nr. 7, S. 852; mit freundlicher Genehmigung der AMS.

Douglas R. Hofstadter
I Am a Strange Loop
Basic Books, New York 2007.
412 Seiten, $ 26,95

MEDIZIN

»Zelluläre Egoisten«

Manfred Reitz erklärt die Biologie der Krebserkrankung – jedoch ohne auf eine der wichtigsten Entdeckungen der vergangenen Jahre einzugehen.

Heimtückisch und raffiniert sei er. Krebs ist Umfragen zufolge hier zu Lande die am meisten gefürchtete Krankheit. Im Jahr 2002 traf es in Deutschland nach neuesten Schätzungen des Robert Koch-Instituts 424 250 Menschen. Fast 200 verschiedene Arten gibt es; bei Frauen ist Brustkrebs die häufigste, bei Männern das Prostatakarzinom. Auf den Plätzen 2 und 3 folgen bei beiden Geschlechtern Darm- und Lungenkrebs. Die Überlebensraten sind sehr unterschiedlich: Fünf Jahre nach der Diagnose leben bei Brustkrebs noch 79 Prozent der Patienten, bei Darmkrebs immer noch 56 Prozent, bei Lungenkrebs nur 12 bis 14 Prozent. Das mittlere Erkrankungsalter liegt für Männer und Frauen bei etwa 69 Jahren. Der Krankheitsverlauf ist bei allen Tumoren sehr individuell. Tröstlich ist allein: Die steigende Lebenserwartung hat zwar zu einem Anstieg der Erkrankungen geführt, doch steigen auch die Chancen, mit und nach einer Erkrankung ein hohes Alter zu erreichen.

Viele Zahlen und Fakten gibt es über Krebs; manche sind verwirrend oder widersprüchlich. In seinem Buch nähert sich Manfred Reitz dem Thema von der biologischen Seite. Der Autor, selbst Biologe und Wissenschaftsjournalist, beschreibt sämtliche Aspekte der Krankheit vom Aufbau einer Zelle bis zur Metastasierung von Tumoren.

Krebs entsteht aus körpereigenen Zellen, die ihre Umgebung dazu bringen, ihnen Energie- und Aufbaustoffe zu liefern. Sie wachsen ohne jeglichen Nutzen für den Organismus – weshalb Reitz sie als »totale Egoisten« bezeichnet. In der Folge vermehren sie sich unkontrolliert, dringen in umliegendes Gewebe ein und zerstören es. Man geht davon aus, dass sich ein Tumor aus einer einzigen mutierten Körperzelle – der so genannten »Mutterzelle« – entwickelt.

Die Ursachen für die Entstehung von Krebs sind noch nicht vollständig geklärt. Der Autor beschreibt nach einem Ausflug in die Zell- und Molekularbiologie kurz ein paar gängige Theorien. Die Entartung von Zellen wird durch bestimmte Gene reguliert: Die Onkogene, auch »Krebsgene« genannt, fördern eine Zellentartung, die Tumor-Suppressorgene, »Anti-Krebsgene«, hemmen sie. Nach der klassischen Theorie können durch Mutationen Onkogene überaktiv oder Tumor-Suppressorgene gehemmt werden. Damit diese Veränderungen überhaupt zur Wirkung kommen, muss allerdings der Reparatur-Mechanismus, der Schäden an der DNA behebt, seinerseits Opfer von Mutationen geworden sein. Nach einer anderen Theorie werden Gene zur Steuerung der Zellteilung beschädigt, worauf diese außer Kontrolle gerät. Eine weitere Annahme geht von fehlenden oder überzähligen Chromosomen aus: Die falsche Chromosomenzahl wirkt schädlich auf die Regulationsfähigkeit der Gene. Ein allgemeines Chaos im Genom der Zelle ist die Folge, das mit jeder Teilung zunimmt und schließlich auch die Onkogene und Tumor-Suppressorgene betrifft.

Manfred Reitz erklärt jedoch nicht nur Theorien, er versorgt uns auch mit praktischer Information über Krebs erregende Faktoren. Chemische Substanzen sowie Röntgen- und UV-Strahlung können zum Beispiel das Erbgut schädigen und so zu Zellentartungen führen. Der Körper kann in gewissem Umfang mit solchen Attacken fertig werden, indem er mittels DNA-Reparatur die Schäden behebt. Gegen Ende des Buchs beschreibt der Autor Besonderheiten wie Wachstum und Durchblutung von Tumoren sowie die Metastasierung.

Zum Schluss geht er noch auf die Therapie ein. Aber mehr als eine grobe Beschreibung der drei Säulen Operation, Bestrahlung und Medikation sowie eine knappe Auflistung neuerer Entwicklungen passen nicht auf die fünf Seiten. Das Buch widmet sich zwar ausdrücklich der Biologie der Krebserkrankung, die meisten Leser dürften sich aber auch gerade für die Therapie interessieren – und kommen hier deutlich zu kurz. Die Bemerkung, jeder Fall müsse bezüglich der Behandlung individuell bewertet werden, hilft da nicht weiter.

Somit scheint das Buch also weniger für Betroffene als vielmehr für Interessierte im Allgemeinen geeignet. Gehalten in sehr sachlichem Stil, stellt es ein Gegenstück zu der sonst so emotional geführten öffentlichen Diskussion dar, enthält sich jedoch auch jeglicher tröstlicher Darstellung der Krankheit und ihrer Heilungsmöglichkeiten. Wer sich jenseits schwammiger Schlagwörter wie »entartete Zellen« und »Krebsgene« einen Überblick über das Gebiet verschaffen möchte, ist mit dem Buch gut bedient. Gut lesbar ist es zudem, da der Autor ein erfahrener Wissenschaftsjournalist ist.

Einen wesentlichen Mangel hat das Werk jedoch: Reitz versäumt es, auf eine der wichtigsten Entdeckungen der Krebsforschung einzugehen. Nach heutiger Erkenntnis können nämlich nicht alle, sondern nur bestimmte Zellen eines Tumors neues bösartiges Gewebe hervorbringen. Die wahren Schuldigen sind demnach entartete Stammzellen oder deren unreife Tochterzellen, deshalb werden sie auch »Krebsstammzellen« genannt. Wie ihre gesunden Schwestern haben sie eine unbegrenzte Lebensdauer und die Fähigkeit, verschiedene andere Zelltypen hervorzubringen. Diese Entdeckung ist vor allem für die Therapie enorm wichtig: Um einen Tumor zu beseitigen, müssen gezielt dessen Stammzellen zerstört werden. Alle anderen Tumorzellen sterben, wie normale Zellen auch, am Ende ihrer Lebenszeit einfach ab.

Die Idee der malignen Stammzellen ist keineswegs neu. Der Ursprung der Stammzellforschung liegt in Untersuchungen an Tumoren und Blutkrebs in den 1950er und 1960er Jahren. Heute gehen Experten davon aus, dass viele, wenn nicht sogar alle Krebsarten auf entartete Stammzellen zurückgehen. Auch wenn dieses Wissen keinen direkten praktischen Nutzen für Betroffene hat, gehört es zweifelsfrei zum Thema des Buchs. Ob Reitz mit seinen »Mutterzellen« entartete Stammzellen meint, sei dahingestellt. Im Register findet man den Begriff jedenfalls nicht.

Anke Römer

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und Wissenschaftsjournalistin in Mannheim.

Manfred Reitz
Die Chaos-Zellen
Biologie der Krebserkrankung
Hirzel, Stuttgart 2006.
220 Seiten, € 19,80

Zeitloses Wissen für Sie archiviert

Spektrum der Wissenschaft Online-Archiv

In unserem Archiv finden Sie alle bisher erschienenen **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993.

>> Als Abonnent haben Sie freien Zugang und können alle Artikel kostenlos als PDF-Datei abrufen, alle älteren als Textdatei.

>> Wenn Sie kein Abonnement von **Spektrum der Wissenschaft** haben, können Sie nach einzelnen Artikeln recherchieren und diese als PDF-Dateien für € 1,– kaufen.

>> Neu: Ab sofort bieten wir Ihnen auch die einzelnen **Spektrum der Wissenschaft**-Ausgaben komplett als digitales Heft für € 5,– an. Somit sind auch ältere, bereits vergriffene Ausgaben wieder für Sie erhältlich.

Zugang zum Archiv finden Sie unter

www.spektrum.de/archiv

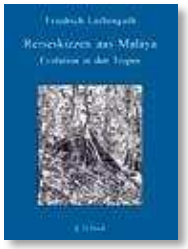
Spektrum der Wissenschaft — Wissen aus erster Hand

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751
service@spektrum.com

ÖKOLOGIE

Was Darwin gefallen hätte

Friedrich Leibenguths »Reiseskizzen aus Malaya« vermitteln Begeisterung für die Tropenwelt und eine Fülle von Wissen zugleich.

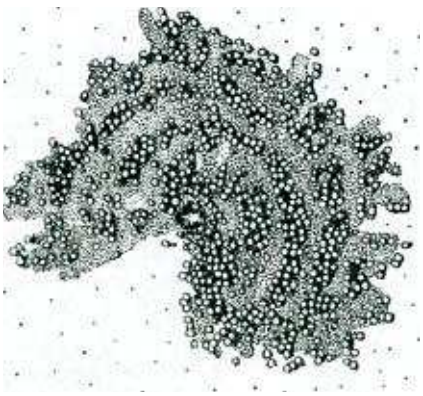


Ich setzte mich in der Dunkelheit daneben, mit Blick hinunter auf die im Sternenlicht glitzernde Wasserfläche. Ich fühlte mich wie in der Gesellschaft eines guten Freundes, mit dem man weder Blickkontakt haben noch Zwiesprache halten muss. Über Gedanken in dieser meiner Situation lässt sich nichts vermelden: Es gab keine. Alles war tiefes Gefühl zu und mit dem Mitgeschöpf neben mir. Erst viel später erinnerte ich mich, bereits einmal so emotional involviert gewesen zu sein: bei der überaus schwermütigen, sich aus der Tonart e-Moll entwickelnden Melodie der Eingangsmusik zu J. S. Bachs Matthäus-Passion.«

So beschreibt Friedrich Leibenguth seine nächtliche Begegnung mit der Riesenlederschildkröte *Dermochelys coriacea* während ihrer Eiablage am Strand von Rantau Abang. Aber seine »Reiseskizzen aus Malaya« sind nicht vorrangig schwärmerische Naturbetrachtung. Dafür ist der Genetiker und Evolutionsbiologe Leibenguth, inzwischen emeritierter Hochschullehrer, zu sehr Realist. Allerdings ist ihm auch als Forscher die Fähigkeit, sich von allem Lebendigen faszinieren zu lassen, nicht verloren gegangen.

Wer sich als Besucher vor Ort oder im trauten Heim in den Zauber der Tropen und in die *story behind the scenery* ein- und entführen lassen will, kommt voll auf seine Kosten. Die *scenery* besteht aus tropischem Regenwald (Primärwald), Sekundärwald, Sand- und Felsküste, Mangrove und Korallenriff. Die *story* zielt im Wesentlichen auf zweierlei ab: Zum einen will sie dem Leser nahebringen, was die Tropen an Unverwechselbarem, gleichsam als Alleinstellungsmerkmal, zu bieten haben, nämlich »die Überfülle an merkwürdigsten Pflanzen- und Tierarten«. Zum anderen spürt sie intensiv den evolutionären Mechanismen hinter der hohen Artenvielfalt nach.

An der Ostküste der Malaiischen Halbinsel: Eine Krabbe der Art *Scopimera proxima* hat den Schlick in der Umgebung ihrer Höhle (Bildmitte) in konzentrischen Ringen zu Fraßpillen verarbeitet.



Die Vermittlung dieser wahrlich komplexen Thematik erfordert eine didaktische Reduktion auf das Wesentliche. Diesem Anspruch wird der Verfasser auf der Grundlage seines umfassenden Wissens, das er auf zahlreichen Forschungsreisen und in jahrzehntelangen Studien erworben hat, voll und ganz gerecht.

Der Stil der Darstellung ist durchaus wissenschaftlich geprägt; dennoch bleibt sie stets verständlich und gut lesbar. Denn mit sicherem Gespür führt Leibenguth den Leser durch das Dickicht biologischer Fachbegriffe wie Geschlechtsdimorphismus, Mimikry und Mimese, Allelendrift oder Irreversibilitätsgesetz und erläutert sie anhand zahlreicher lebendig präsentierter Beispiele. So werden auch ohne Glossar die Fachtermini – selbst bei gelegentlichen Ausflügen in die Populations- oder Molekulargenetik – aus dem Kontext verständlich. Wie gründlich Begriffe geklärt werden, erfährt, wer sich etwa mit den neun Hypothesen zur Artendiversität beschäftigt, die der Verfasser gegeneinander abgrenzt und am Beispiel von Primärwald und Korallenriff auf die Probe stellt.

Fast 90 teilweise ganzseitige schwarzweiße Federzeichnungen von Leibenguths eigener Hand, fachlich instruktiv und fantasieanregend zugleich, tragen wesentlich zur Anschaulichkeit der »Reiseskizzen« bei. Ein Feldführer oder Bildband über die Tropen will das Buch ausdrücklich nicht sein. Daher sind Farbabbildungen entbehrlich. Ein mehrseitiges und vielfältig anregendes Literaturverzeichnis rundet das Werk ab.

Wer sich als Biologe oder Laie mit biologischem Grundwissen auf die »Reiseskizzen« einlässt, wird sie mit wachsender Spannung lesen, und sein Blick auf den Lebensraum Tropen wird sich ständig weiten. Bei der Begegnung mit der Farbenpracht des Korallenriffs, mit »Kuriositäten« wie den emsigen Putzerfischen, den Insekten fangenden Kannenpflanzen, den signalgebenden Winkerkrabben, den treffsicheren Schützenfischen, den vorwitzig-glotzäugigen Schlammspringern oder dem majestätischen Python wird sich – auch im Hinblick auf die eigene Spezies – ein Gefühl für die Zusammenhänge von Sein, Werden und Gewordensein einstellen.

Es erhöht den Unterhaltungswert des Buches, dass Leibenguth immer wieder über den Tellerrand seines Fachs hinausblickt, zum Beispiel indem er auf originelle Weise Parallelen zwischen biologischer und kultureller Evolution zieht und dabei Mutationen mit Ideen, natürliche Auslese mit Ideenwettstreit und Exzessivbildungen mit Wespentaillen oder Barockfrisuren vergleicht.

Die biologisch-fachlichen Kapitel, die den größten Teil des Textes ausmachen, werden zwanglos – dem Titel »Reiseskizzen« getreu – von Tagebucheintragungen unterbrochen. Plastisch schildert Leibenguth seine Begegnungen mit Land und Leuten und macht damit deutlich, wie sehr er sich den Menschen der Region verbunden fühlt, nicht zuletzt den Ureinwohnern des Landes, den Orang Asli, die er in seine evolutionsgenetischen Untersuchungen und Betrachtungen mit einbezieht.

Dem Tropenreisenden sei zur Vorsicht ein nützlicher Hinweis des Autors ans Herz gelegt: »Jährlich kommen ungefähr 150 Menschen durch herabfallende Kokosnüsse zu Tode, während es pro Jahr nur 5 bis 10 tödliche Haiangriffe gibt.« Da scheint es schon sicherer, in der Dämmerung und unter Wasser den majestätisch dahingleitenden Rotfeuerfisch aufzuspüren.

Heribert Steinmetz

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Leiter des St.-Matthias-Gymnasiums in Gerolstein.

Friedrich Leibenguth
Reiseskizzen aus Malaya
Evolution in den Tropen

Karl Heinrich Bock, Köln 2006.
330 Seiten, € 19,80

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

SEIFENHÄUTE

Optimale Schäume

Wie kann eine Seifenlösung ein möglichst großes Volumen mit möglichst wenig Materialaufwand einschließen? Jedenfalls nicht auf die regelmäßigste Weise

WIEBKE DRENCKHAN (WWW.MATHSTCD.IE/~WIEBKE/)

»Die Wahrheit über die Entdeckung der Phelan-Weaire-Struktur«

Von Norbert Treitz

Man tunke das Drahtgestell eines regelmäßigen Tetraeders in eine Mischung aus Spülmittel und Wasser im Verhältnis von ungefähr 1:10 und ziehe es vorsichtig und möglichst blasenfrei wieder heraus. Es zeigen sich in perfekter Symmetrie sechs ebene Lamellen in Form gleichschenkliger Dreiecke, die jeweils einer Kante des Tetraeders anliegen, paarweise zwischen sich 120 Grad Faltenwinkel haben und sich im Mittelpunkt treffen (Bild unten, links). Wenn man – aus Versehen oder absichtlich – durch nochmaliges Eintunken eine Luftblase einschließt, so wird diese von vier Kugelstücken begrenzt, die einander und die ebenen Lamellen in Kreisbögen treffen.

Schön, denkt man sich, da erzwingt, wie so häufig, die Symmetrie der Randbedingungen (in diesem Fall des Drahtgestells) die Symmetrie des gesamten Systems. Aber die Begründung stimmt diesmal nicht. Seifenhautlamellen treffen sich immer zu dritt unter dem Winkel 120 Grad, und wenn diese Begrenzungskanten aufeinandertreffen, tun sie das stets zu viert, und zwar unter dem Winkel, den auch die Verbindungslinien von den Ecken eines regelmäßigen Tetraeders zu dessen Mittelpunkt miteinander bilden: $\arccos(-1/3) = 109{,}4712$ Grad.

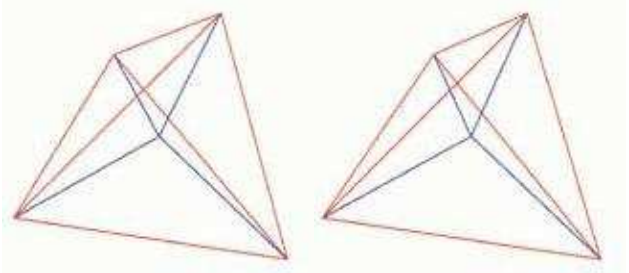
Diese beiden Gesetze hatte bereits der belgische Physiker Joseph Plateau (1801–1863) gefunden. Sie sind darin begründet, dass Seifenhäute einen Zustand minimaler Oberfläche anstreben (SdW 12/1998, S. 14). Ihre so genannte Oberflächenenergie ist nämlich proportional der Oberfläche. Ein System von Seifenhäuten wird also überschüssige Energie über Reibungsprozesse in die weite Welt verteilen; da sie von dort nicht von allein zurückkommt, landet das System in einem »stabilen Gleichgewicht«, und das heißt in einem (relativen) Minimum der Energie wie auch der Oberfläche.

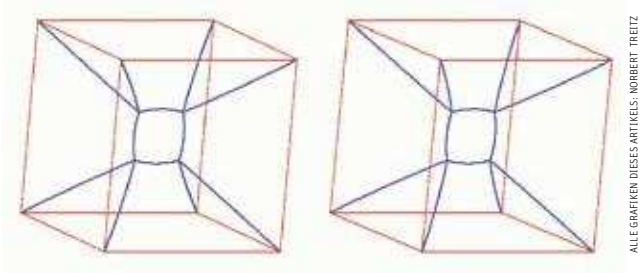
Eine Fläche hat in jedem ihrer Punkte im Allgemeinen verschiedene Krümmungen, je nachdem, in welcher Richtung man von diesem Punkt aus die Fläche entlangschaut. Diese Krümmungen können verschiedene Vorzeichen haben, wie zum Beispiel bei einer Passhöhe, wo die Fläche in Wanderrichtung vom Wanderer weg und in der dazu senkrechten Richtung auf ihn zu gekrümmt ist. In jedem Punkt einer Seifenhaut ist die mittlere Krümmung (der Mittelwert von maximaler und minimaler Krümmung) proportional zur Differenz der Luftdrücke beider Seiten. Das führt bei Seifenblasen wegen des inneren Überdrucks zur Kugelform und bei Figuren mit Druckgleichheit zu Ebenen oder zu so genannten Minimalflächen (SdW 10/1990, S. 96).

Aber woher kommen die 120 Grad? Man lege eine Ebene rechtwinklig zu der Kante, an der sich die drei Lamellen treffen, und findet, dass das Problem des kleinsten Flächeninhalts auf das Fermat-Torricelli-Problem im ebenen Dreieck hinausläuft. Pierre de Fermat (1601–1665) wollte gerne wissen, für welchen Punkt im Dreieck die Summe der Entfernungen zu den drei Ecken minimal ist. Evangelista Torricelli (1608–1647) fand die Antwort: Es ist der Punkt, von dem aus die Sehwinkel auf die Seiten sämtlich gleich 120 Grad sind (SdW 4/1995, S. 10).

Der biedere Würfel

Dieser Körper ist uns sehr vertraut, und wir erwarten eigentlich eher Banales von ihm. Teilen wir ihn von der Mitte aus in sechs Pyramiden, so haben alle Kantenwinkel den optimalen Wert 120 Grad. Dieses Bild könnte man erwarten, wenn





ALLE GRAFIKEN DIESES ARTIKELS: NORBERT TREITZ

Die sechs Seifenhautlamellen teilen das reguläre Draht-Tetraeder (links, rot) in vier gleiche Tetraeder von je 1/4 der Höhe. Rechts: Der Würfel wird von den 13 Lamellen annähernd in vier Dächer und zwei Pyramidenstümpfe zerlegt. Die Symmetrie wird durch das Bogenquadrat in der Mitte gebrochen.

Zu den Stereobildern

Schauen Sie entweder überkreuz oder nahezu parallel mit beiden Augen auf die jeweils zwei Teilbilder, sodass Sie das Bild dreifach sehen. Das mittlere ist dann echt stereoskopisch. Wegen der Durchsichtigkeit der Objekte und der gewählten Fern-Perspektive ist die Zuordnung gleichgültig. Zur Entkoppplung von Akkommodation und Ausrichtung der Augenachsen sind etwas Geduld und Übung nötig und lohnend.

man ein Würfeldrahtgestell aus der Spülmittellösung zieht; aber das Seifenwasser weiß es besser.

Um das zu verstehen, steigen wir auch hier vorübergehend ab in die zweite Dimension: Vier Ecken eines Quadrats sollen durch Straßen verbunden werden, deren Gesamtlänge minimal sein soll. Besser als ein Kreuz aus den beiden Diagonalen und sogar optimal ist ein Netz, das wie ein Mittelding aus einem H und einem X aussieht und an dessen Verzweigungspunkten sich wieder je drei Linien unter 120 Grad treffen. Diese Lösung bricht die Symmetrie des Quadrats, denn im Gegensatz zu diesem geht sie durch Drehung um einen rechten Winkel nicht in sich selbst über, sondern in eine andere, gleichberechtigte Lösung des Minimierungsproblems.

Entsprechend ersetzen wir den Treffpunkt der Pyramidenkanten im Würfelmittelpunkt durch ein kleines Quadrat, das parallel zu zweien der Würfelseitenflächen genau in deren Mitte liegt und den Würfelmittelpunkt zum Mittelpunkt hat. Die beiden Pyramiden, deren Grundflächen diese Würfelseitenflächen sind, verbreitern sich dadurch zu Pyramidenstümpfen; aus den vier anderen werden Dachfiguren, deren Firste jeweils gleich einer Quadratseite sind. Das sieht der beobachteten Seifenhautfigur schon so ähnlich, dass viele Autoren und noch mehr Zeichner es für die ganze Wahrheit halten (ich früher leider auch!). Es stimmt aber nicht; denn die Lamellenkanten, die von innen zu den Würfelecken laufen, haben ungleiche Winkel zwischen den Lamellen. Außerdem müssten die rechten Winkel des Quadrats eigentlich Tetraederwinkel sein. Das Seifenwasser im Würfel weiß sich jedoch zu helfen (Bild links unten, rechts): Die Kanten des Quadrats krümmen sich nach außen und vergrößern dabei die Winkel zwischen sich. Die anderen Kanten krümmen sich ebenfalls, und die zwölf Lamellen, die zu den Würfelkanten reichen, wölben sich zu nicht-ebenen Flächen, deren mittlere Krümmung an jeder Stelle gleich null ist.

Der isoperimetrische Quotient

Warum sind Konservendosen nicht kugelrund? In erster Linie, weil man Blech zwar gut biegen, aber nicht so gut wölben kann. Auch die Packungsdichte ist für Zylinder selbst bei der ungeschickten Quadrat-Packung etwas günstiger als die beste Kugelpackung ($\pi/4 = 78{,}4$ statt 74 Prozent). Wenn man viel Volumen V mit wenig Oberfläche O verpacken will, so ist der dimensionsfreie »isoperimetrische Quotient« (IPQ) $36\pi V^2/O^3$ ein gutes Maß für den Erfolg solcher Bemühungen. Er ist für die Kugel gleich 1 (mit dem Faktor 36 π passend gemacht) und für den Würfel $\pi/6 = 52{,}36$ Prozent.

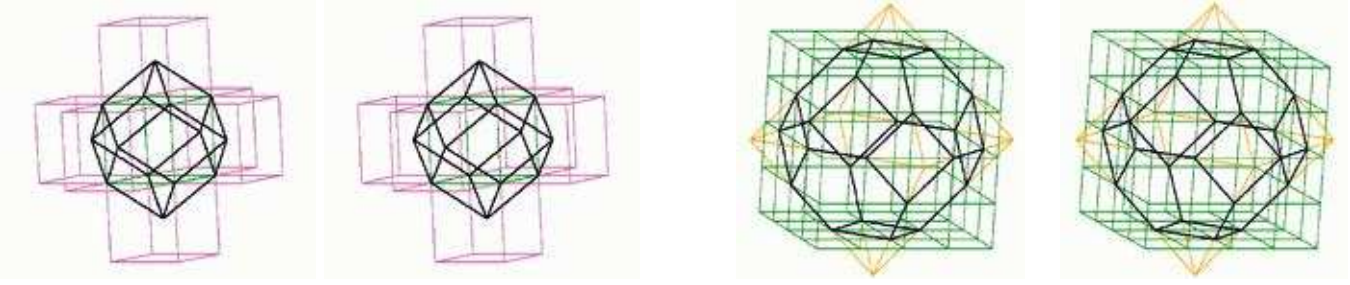
Das Problem, ein gegebenes Volumen mit möglichst wenig Oberfläche zu umhüllen, haben nicht nur die Konservenhersteller, sondern auch die Bienen beim Wabenbau (SdW 11/1999, S. 12) und – wegen des Bestrebens zur Flächenminimierung – die Seifenhäute. Man stelle sich vor, ein – im Prinzip unendlich ausgedehnter – Schaum bestehe aus lauter Blasen gleichen Innendrucks, sodass die Trennwände zwischen ihnen wieder verschwindende mittlere Krümmung haben. Welche Form nehmen die Blasen an?

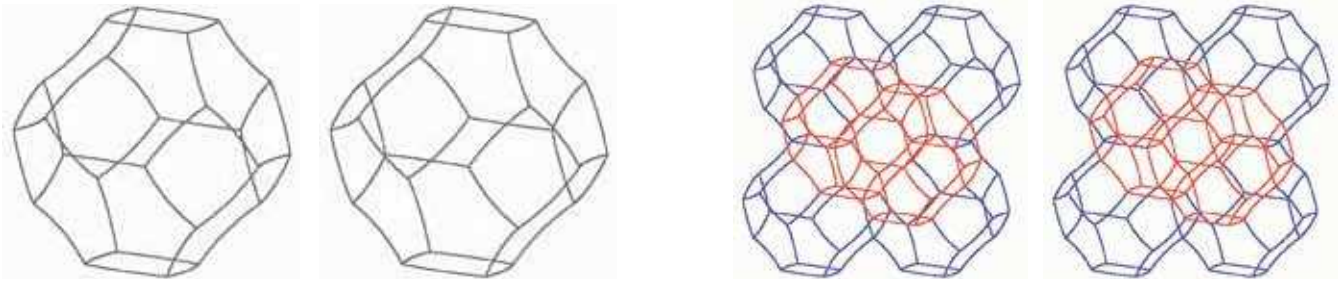
Die Beobachtung real existierender Schäume (SdW 7/1986, S. 126) gibt wenig Aufschluss. Für die Theorie folgen wir zunächst dem Vorbild des britischen Physikers William Thomson (1824–1907), der sich 1887 über Schaum als Modell des hypothetischen Trägermediums der elektromagnetischen Wellen, des »Äthers«, Gedanken machte. Thomson wurde 1890 zum 1. Baron Kelvin of Largs ernannt; so kam der Kelvin, ein eher unbedeutender Nebenfluss des Clyde durch Glasgow, zu Weltbekanntheit als Einheit der absoluten Temperatur.

Als Lord Kelvin noch Sir William Thomson hieß, dachte er zuerst über den einfachsten Fall nach: Alle Zellen sind gleich und liegen in einer regelmäßigen Anordnung ähnlich derjenigen, in der lückenlos aneinandergereihte Würfel aufgestapelt sind. Aber würfelförmig können sie nicht sein: An jeder Ecke würden sich acht Zellen, zwölf Lamellen und sechs Kanten treffen, was in jeder Hinsicht zu viel wäre. Es scheint zweckmäßig, nach weiteren Polyedern, das heißt von ebenen Flächen begrenzten Körpern, zu suchen, die in vielen Exemplaren aufeinandergestapelt ebenso den Raum füllen wie der Würfel.

Erster Kandidat ist das Rhombendodekaeder (Bild unten, links): Man mache die Würfel einer Raumfüllung schachbrettartig schwarz und weiß und schlage jedem weißen Würfel den Teil seiner sechs schwarzen Nachbarn zu, der ihm näher liegt als jedem seiner weißen Kollegen; das ist die Pyramide mit der entsprechenden Würfelfläche als Grundfläche und dem Mittelpunkt des schwarzen Würfels als Spitze. Über eine Würfelkante hinweg vereinigen sich zwei dreieckige Pyramidenseiten, die in einer ▷

Links das catalansche Rhombendodekaeder mit sieben Würfeln, von denen einer ganz und sechs zu je einem Sechstel in ihm liegen; rechts der archimedische Oktaederstumpf als Schnitt aus Würfel und regulärem Oktaeder





▷ Ebene liegen, zu einer Raute, sodass schließlich ein von zwölf Rauten begrenztes Polyeder entsteht.

Die kurze Diagonale jeder Raute ist gleich der ursprünglichen Würfelkante k, die lange hat die Länge $k\sqrt{2}$; damit hat das Rhombendodekaeder die Oberfläche $12\ k^2\sqrt{2}/2$, das Volumen $2k^3$ und den IPQ 0,7405 – schon deutlich besser als der Würfel. Aber die Lamellen von Seifenblasen in Rhombendodekaeder-Schäumen würden sich in den spitzen Ecken so treffen wie die Pyramidenflächen im Würfelmittelpunkt; und wir wissen schon, dass diese Anordnung nicht stabil ist.

Kelvin und der Oktaederstumpf

Ein weiteres raumfüllendes, auf den ersten Blick recht gewöhnliches Polyeder wartet mit einer Fülle von Besonderheiten auf, die es auch für unseren Schaum interessant machen: der (archimedische) Oktaederstumpf. Wir schneiden einen Würfel der Kantenlänge $4a$ mit einem regulären Oktaeder der Diagonalenlänge $6a$ in der im Bild auf S. 99 rechts gezeigten Orientierung. Es ergibt sich ein archimedisches (halbregelmäßiges) Polyeder; an jeder seiner 24 zueinander äquivalenten Ecken treffen sich ein Quadrat und zwei regelmäßige Sechsecke. Seine Kanten haben die Länge $k = a\sqrt{2}$, also 1/3 von der des Oktaeders. Seine Oberfläche besteht aus sechs Quadraten zu je k^2 und acht Sechsecken zu je $3k^2\sqrt{3}/2$ Oberfläche, das macht für den isoperimetrischen Quotienten 0,753367, also etwas besser als bei dem zuvor betrachteten Rhombendodekaeder.

In der raumfüllenden Anordnung treffen sich die Zellen zu viert in den Ecken und zu dritt entlang jeder Kante, wie es sich für Systeme von Seifenhautlamellen gehört. Nur die Winkel stimmen noch nicht: Die zwischen zwei Sechsecken sind um etwa 10 Grad zu klein und die zwischen einem Quadrat und einem Sechseck um etwa 5 Grad zu groß.

Wie berechnet man diese Winkel? Man bestimme das rechtwinklige Dreieck aus Körpermittelpunkt A, Mittelpunkt B einer Fläche und Mittelpunkt C einer diese Fläche begrenzenden Kante. Der Winkel bei C plus der entsprechende Winkel zur Nachbarfläche ergeben zusammen die Winkel der beiden Flächen gegeneinander. Der Winkel zwischen den Sechsecken ist genau gleich dem Tetraederwinkel, obwohl der ja im regulären Tetraeder nicht zwischen Flächen, sondern zwischen Geraden vorkommt. Er müsste aber gleich 120 Grad sein.

Kelvin fand die Lösung des Problems, möglicherweise durch Experimentieren. Seine Nichte traf den 63-Jährigen eines Tages bei einem Besuch mit Seifenblasen spielend an. Er hatte auch ein matratzenähnliches Gitter aus Drähten gebaut, das die Universität Glasgow als »Kelvin's bedspring« in Ehren hält.

Es genügt, die Seiten der Quadrate in deren Ebenen nach außen auszubeulen, ganz ähnlich wie beim Quadrat im Drahtwürfel. Die Kanten, an denen zwei Sechsecke aneinandergrenzen, scheinen zunächst von dieser Ausbeulung unbetroffen. Aber in der Raumfüllung stößt genau an diese Kanten ein Quadrat von der Nachbarzelle, das sich ebenfalls ausbeult und damit unsere Sechseckskante zur Mitte des Polyeders hin eindellt.

Die Quadrate sind also ebene Bogenquadrate, aber die Sechsecke nicht genau eben, sondern leicht affensattelartig gekrümmt. (Anders als der gewöhnliche Sattel geht der Affensattel in drei statt zwei Richtungen abwärts und dazwischen aufwärts, damit der Affe seinen Schwanz bequem unterbringen kann.) Der IPQ wird dabei zu 0,757, also besser als alles, was wir bisher bei Raumfüllern bekommen haben, und es gibt auch keinen offensichtlichen Grund zur Instabilität.

Am einzelnen Oktaederstumpf des Kelvin-Schaums (links) gibt es zweierlei Kanten: Die Seiten von Quadraten sind nach außen verbogen, die Kanten zwischen zwei Sechsecken dagegen zur Mitte des Polyeders hin. Im Schaum (rechts) zeigt sich: Jede Kante liegt an einem Bogenquadrat und zwei unebenen Sechsecken, es gibt also im ganzen Gitter nur eine Sorte von Kanten.

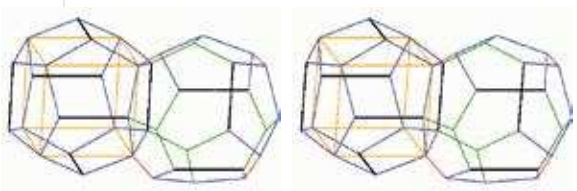
Bessere Raumfüller mit Hilfe von Dodekaedern

Kelvin war davon überzeugt, dass idealer Schaum aus diesen Beinahe-Polyedern aufgebaut sein muss. Es dauerte 107 Jahre, bis seine Vermutung widerlegt wurde. 1994 erfanden Robert Phelan und Daniel Weaire vom Trinity College in Dublin den nach ihnen benannten Schaum mit dem IPQ von 0,764. Er ist deutlich weniger symmetrisch und besteht aus zweierlei unregelmäßigen Polyedern im Zahlenverhältnis 2 : 6.

Das einfachere davon ist ein unregelmäßiges Pentagon-Dodekaeder von immer noch beachtlicher Symmetrie. Denken Sie sich einen Würfel mit den acht Ecken $(\pm 4, \pm 4, \pm 4)$ und setzen Sie ihm auf jede Fläche ein Dach mit den insgesamt zwölf zusätzlichen Ecken $(0, \pm 3, \pm 6)$, $(\pm 3, \pm 6, 0)$ und $(\pm 6, 0, \pm 3)$. An jeder Kante des Würfels treffen sich ein Dreieck und ein in derselben Ebene liegendes Trapez zu einem Fünfeck, das vier gleiche Seiten der Länge $\sqrt{21}$ und eine mit der Länge 6 hat; die zu dieser langen Seite parallele Diagonale ist eine Würfelkante. Dieses Dodekaeder besteht also aus zwölf deckungsgleichen Fünfecken und hat zweierlei Kantenlängen.

Zu diesen Dodekaedern gesellt sich nun die dreifache Menge an untereinander gleichen Vierzehnflächnern. Jeder

Die beiden Polyeder des Phelan-Weaire-Schaums. Gleiche Farben bedeuten gleiche Kantenlängen. In das Dodekaeder ist orange ein Würfel eingezeichnet, um die Symmetrie zu verdeutlichen.



von ihnen besteht aus zwei Sechsecken und zwölf Fünfecken. Die beiden Sechsecke sind ungleichseitig, liegen aber in parallelen Ebenen, wenn auch um einen rechten Winkel gegeneinander verdreht. An jedem Sechseck hängt ein Ring von sechs Fünfecken; davon sind zwei einander gegenüberliegende identisch mit den Dodekaederflächen, die vier anderen sind immerhin noch untereinander gleich und in sich spiegelsymmetrisch. Beide Ringe aus Fünfecken greifen ineinander wie Ober- und Unterkiefer eines Raubtiers.

Der Phelan-Weaire-Schaum besteht also insgesamt aus dreierlei Flächen mit viererlei Kantenlängen. Er ist gar nicht so unregelmäßig, wie es auf den ersten Blick scheint: Die Dodekaeder sitzen in den Mittelpunkten und den Ecken eines regelmäßigen Würfelgitters. Dazwischen verlaufen in allen drei Raumrichtungen »Stangen« aus – Sechseck auf Sechseck – gestapelten Vierzehnflächnern.

Und wie steht es mit den Winkeln zwischen Flächen? Sie stimmen nicht genau; so liegen sie beim Dodekaeder zwischen 113,578 und 126,87 Grad, und beim numerischen Optimieren nehmen die Flächen wieder eine leicht gewölbte Form an. Aber schon mit ebenen Flächen hüllt der Schaum ein gegebenes Volumen mit etwas weniger Seifenwasser ein als der von Kelvin.

Ob dieser Schaum nun theoretisch optimal ist, weiß man nicht. Man weiß auch nicht, ob wenigstens unter den gleichzelligen Schäumen der von Kelvin (und unter den verbiegungsfreien, also exakten Polyedern einer einzigen Sorte der archimedische Oktaederstumpf) der beste ist. Wie die Geschichte zeigt, muss man da sehr vorsichtig sein. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

AUTOR UND LITERATUR

The Pursuit of Perfect Packing. Von Tomaso Aste und Denis Weaire. Institute of Physics Publishing, Bristol 2000

The Physics of Foams. Von Denis Weaire und Stefan Hutzler. Oxford University Press, Oxford 2001

Weblinks sowie eine Langfassung dieses Artikels mit zahlreichen weiteren Stereobildern finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/896276.

rowohlt

www.rowohlt.de

© Bernd Ebsen

Korruptionspflichtig

Markus Grill über die Machenschaften der Pharmaindustrie

Markus Grill
Kranke Geschäfte
224 Seiten. Klappenbroschur
€ 16,90 (D)

Versöhnung oder Trennung?

BEIDE: MATT COLLINS

Die Forscher **Lawrence M. Krauss** und **Richard Dawkins** diskutieren, wie Wissenschaftler mit Religion umgehen können. Eine Debatte auch über den Kreationismus

Krauss: Wir wollen darüber sprechen, was die primären Absichten eines Wissenschaftlers sind, der über Religion spricht oder schreibt. Ich frage mich, was wichtiger ist: die Unterschiede zwischen Wissenschaft und Religion dafür zu nutzen, um Wissenschaft zu lehren, oder zu versuchen, Religion an deren Stelle zu setzen. Ich neige eher dazu, mich auf das Erstere zu konzentrieren, und Sie wohl eher auf das Letztere.

Ich sage dies, weil es – wenn jemand junge Menschen unterrichten will – klar sein sollte, dass er auf sie zugeht, dass er zu verstehen versucht, welchen Hintergrund sie haben, wenn er sie dazu »verführen« will, über Wissenschaft nachzudenken. Ich sage Lehrern oft, der größte Fehler läge in der Annahme, dass die Schüler von vornherein an ihren Lehrinhalten interessiert seien. Lehren ist in diesem Sinne verführen. Wenn man den Leuten hingegen sagt, dass ihre tiefsten Überzeugungen schlicht töricht seien – selbst wenn dies tatsächlich so wäre – und sie uns zuhören sollen, um die Wahrheit zu erfahren, so widerspricht dies elementaren pädagogischen Prinzipien. Wenn es stattdessen die vorrangige Absicht ist, Religion angemessen zu würdigen, dann mag es vielleicht hilfreich sein, die Leute zunächst zu schockieren, indem man ihre Glaubensgrundsätze in Frage stellt.

Dawkins: Dass ich Religion für schlechte Wissenschaft halte, während Sie denken, sie ergänze die Wissenschaft, heißt doch, dass wir uns in verschiedene Richtungen bewegen. Ich stimme zu, dass Lehren Verführen ist, und es könnte eine schlechte Idee sein, das Publikum von Anfang an gegen sich einzunehmen.

Doch niemand bewundert einen unehrlichen Verführer, und ich frage mich, wie gut Sie es verstehen, auf die Leute zuzugehen. Das wird schwierig, wenn jemand die Erde für eine Scheibe hält. Ähnliches gilt für einen Junge-Erde-Kreationisten, der glaubt, das ganze Universum habe erst in der Mittleren Steinzeit begonnen. Aber Sie könnten vielleicht auf einen Alte-Erde-Kreationisten zugehen, der glaubt, Gott habe alles in die Wege geleitet und dann nur noch hin und wieder eingegriffen, um der Evolution über größere Hürden hinwegzuhelfen. Der Unterschied zwischen uns beiden ist somit lediglich quantitativ. Sie wollen etwas weiter auf Leute zugehen als ich. Aber ich vermute, nicht sehr viel weiter.

Krauss: Lassen Sie mich klarstellen, was ich mit Auf-Leute-Zugehen meine. Ich meine damit nicht, falschen Vorstellungen nachzugeben. Vielmehr will ich einen Weg finden, der ihnen klarmacht, dass es sich dabei um Missverständnisse handelt. Ein Beispiel: Ich habe gelegentlich mit Kreationisten zu tun und anderen, die an Entführungen durch Außeridische glauben.

Beide Gruppen teilen ähnliche Irrtümer, was die Art von Erklärungen betrifft. Sie glauben, dass man nichts verstanden hat, wenn man nicht alles verstanden hat. In Diskussionen tischen sie dann gerne abwegige Behauptungen auf – etwa die, dass 1962 einige Leute in der Äußeren Mongolei eine fliegende Untertasse gesehen hätten, die über einer Kirche schwebte. Dann fragen sie mich, ob mir dieser Vorfall bekannt sei, und sobald ich dies verneine, sagen sie: »Wenn Sie nicht jeden einzelnen dieser Vorfälle untersucht haben, können Sie nicht behaupten, dass eine Entführung durch Außerirdische unwahrscheinlich ist.«

Mir fiel auf, dass ich all diese Menschen dazu bringen kann, über das, was sie sagen, nachzudenken, indem ich ihnen die jeweils andere Gruppe als Spiegel vorhielt. Wenn ich nämlich die Kreationisten frage: »Glauben Sie an fliegende Untertassen?«, sagen sie unweigerlich Nein. Dann frage ich sie: »Warum? Haben

Sie alle diese Behauptungen untersucht?« Ähnlich gehe ich bei den Entführungs-Gläubigen vor, die ich frage: »Glauben Sie an den Junge-Erde-Kreationismus?« Sie sagen Nein und legen Wert darauf, wissenschaftlich gebildet zu sein.

Dann frage ich sie: »Warum? Haben Sie jede einzelne Gegenbehauptung untersucht?« Im Kern geht es mir bei jeder Gruppe darum, ihr klarzumachen, dass es durchaus vernünftig ist, Theorien auf eine zahlreiche Beweise zu stützen, ohne jede einzelne entlegene Gegenbehauptung selbst untersucht zu haben. Dieses Lehrkonzept hat in den meisten Fällen funktioniert – außer in den seltenen Fällen, dass der Entführungs-Paranoiker zugleich Kreationist war!

Dawkins: Mir gefällt, was Sie unter Auf-Leute-Zugehen verstehen. Ich möchte jedoch daran erinnern, wie leicht man missverstanden werden kann. Einmal schrieb ich in einer Buchrezension: »Sicher ist jemand, der bei einer Unterhaltung behauptet, nicht an die Evolution zu glauben, ungebildet, dumm oder verrückt.« Dieser Satz wurde immer wieder zitiert, um zu belegen, dass ich ein fanatischer, intoleranter und bornierter Schwätzer sei. Doch sehen Sie sich meinen Satz einmal an. Er klingt vielleicht nicht verführerisch. Aber Sie, Lawrence, wissen im Grunde, dass es sich um eine nüchterne Tatsachenfeststellung handelt.

Unkenntnis ist kein Verbrechen. Jemanden ahnungslos zu nennen ist keine Beleidigung. Wir alle sind unwissend bezüglich der meisten Dinge, die es zu wissen gibt. Ich verstehe rein gar nichts von Baseball. Wenn ich zu jemandem, der glaubt, die Welt sei sechstausend Jahre alt, sage, er sei ahnungslos, mache ich ihm immerhin das Kompliment, dass er weder dumm, verrückt noch bösartig ist.

Krauss: Für mich ist Ignoranz oft ein Problem, das sich zum Glück meist leicht beheben lässt. Es würdigt ja niemanden herab, wenn er wissenschaftliche Fakten falsch verstanden hat.

Dawkins: Zugegeben, ich hätte einladender auf die Leute zugehen können. Doch es gibt Grenzen. Folgendes würde ich zum Beispiel nicht sagen: »Verehrter Junge-Erde-Kreationist, ich respektiere Ihre Ansicht, dass die ▷

Obwohl beide auf Seiten der Wissenschaft stehen, verfolgen Krauss und Dawkins unterschiedliche Wege, wie man im wissenschaftlichen Alltag oder in Vorlesungen mit religiös motivierten Konflikten umgehen soll. Lawrence M. Krauss, ein prominenter Astrophysiker, wendet sich regelmäßig an die Öffentlichkeit. Er setzt sich dafür ein, Evolutionstheorie an den Schulen zu unterrichten und pseudowissenschaftliche Lehren wie den Kreationismus daraus zu verbannen. 2005 forderte er von Papst Benedict XVI. in einem offenen Brief, zwischen Wissenschaft und Glauben keine neuen Mauern zu errichten. Daraufhin bekräftigte der Vatikan, dass die Katholische Kirche die natürliche Selektion als fundierte wissenschaftliche Theorie anerkenne.

Auch Richard Dawkins kritisiert alle Versuche, wissenschaftliches Denken zu diskreditieren. Anders als Krauss versucht er aber nicht primär, Wissenschaft und Religion miteinander zu versöhnen. In seinem Bestseller »The God Delusion« (»Der Gotteswahn«, Ullstein-Verlag) fasst der Evolutionsbiologe seine Auffassungen zur Religion zusammen.

Ende 2006 fand im Salk Institute for Biological Studies in San Diego eine Konferenz statt, die dem Disput zwischen Wissenschaft und Religion gewidmet war. Im hier rekonstruierten Dialog erläutern beide Forscher ihre jeweiligen Strategien, mit denen sie ihren Kritikern begegnen. Sie diskutieren darüber, ob und wie ein Forscher über Wissenschaft zu religiösen Menschen sprechen sollte. Sollen sie Wissenschaft lehren oder Religion diskreditieren? Können sich beide Weltsichten gegenseitig bereichern? In der Langfassung dieses Gesprächs (auf Englisch unter www.sciam.com/ontheweb, siehe July 2007) befassen sich die Autoren zudem mit dem Thema, ob Wissenschaft jemals die Gottes-Hypothese auf den Prüfstand bringen kann.

AUTOREN

Lawrence M. Krauss ist Professor an der Case Western Reserve University in Cleveland, Ohio, und dort Leiter des Center of Education and Research in Cosmology and Astrophysics. Der Astrophysiker publizierte zahlreiche Bücher und erhielt viele Preise. In seiner Freizeit trat er schon mit dem Cleveland Orchestra auf, war Jury-Mitglied beim Sundance Film Festival in Park City, Utah, und schrieb mehrere Artikel für Spektrum der Wissenschaft.

Richard Dawkins ist Professor für Public Understanding of Science an der University of Oxford in England. Für seine Bücher erhielt er Ehrenpromotionen in Literatur und Naturwissenschaft. Er ist Fellow der Royal Society sowie der Royal Society of Literature. 2006 gründete er die Richard Dawkins Foundation for Reason and Science.

Kampfplatz der Überzeugungen

Eine Umfrage aus dem Jahr 2005 unter Mitgliedern der US-amerikanischen National Science Teachers Association brachte folgende Resultate:

- **30 Prozent** fühlten sich unter dem Druck, Evolutionslehre aus ihrem Unterricht zu verbannen
- **31 Prozent** fühlten sich unter Druck, nichtwissenschaftliche Alternativen zur Evolutionslehre zu unterrichten

Bei dem Baylor Religion Survey aus dem Jahr 2006 wurden 1720 Erwachsene interviewt. Ergebnis:

- **70 Prozent** waren dafür, dass Gebete in Schulen erlaubt werden sollten
- **25 Prozent** glaubten, dass es sich bei manchen Ufo-Sichtungen vermutlich um Raumschiffe von anderen Sternen handelt
- **89 Prozent** glaubten nicht, dass Gott irgendeine politische Partei unterstütze
- **69 Prozent** glaubten nicht, dass Gott die USA in irdischen Dingen unterstütze

Eine »Newsweek«-Umfrage von 2007 unter 1004 Erwachsenen ergab:

- **48 Prozent** der Befragten glaubten, Gott hätte Menschen in ihrer jetzigen Form innerhalb der letzten zehntausend Jahre erschaffen
- **30 Prozent** glaubten, dass Menschen sich aus niedrigeren Lebensformen entwickelt haben, wobei Gott den Prozess beeinflusste

▷ Welt sechstausend Jahre alt sei. Dennoch möchte ich höflichst vorschlagen, dass Sie Bücher zu folgenden Themen lesen: Geologie, Radioisotopen-Datierung, Kosmologie, Archäologie, Geschichte, Zoologie. Sie werden von diesen Werken fasziniert sein (neben der Bibel, selbstverständlich), und es könnte sein, dass Sie bemerken, warum nahezu alle gebildeten Menschen annehmen, dass die Welt einige Milliarden – und nicht Tausende – von Jahren alt ist.«

Wie wäre es stattdessen, mit solchen Leuten Klartext zu reden, statt vorzugeben, ihre törichten Ansichten zu respektieren? Man könnte dem Junge-Erde-Kreationisten die Diskrepanz vorhalten, die zwischen seiner und der wissenschaftlichen Sichtweise besteht: »Sechstausend Jahre ist nicht nur ein kleiner Unterschied zu 4,6 Milliarden Jahren, sondern vergleichbar damit, als würden Sie behaupten, New York und San Francisco wären nicht 5500 Kilometer voneinander entfernt, sondern nur etwa sieben Meter. Natürlich akzeptiere ich es, wenn Sie mit Wissenschaftlern nicht übereinstimmen. Aber es wird Sie vermutlich nicht allzu sehr schmerzen, wenn Ihnen – in Form unstrittiger Arithmetik – die tatsächliche Dimension Ihrer abweichenden Auffassung vor Augen geführt wird.«

Krauss: Das ist keineswegs zu viel Klartext, sondern genau das, was ich befürworte, nämlich ein produktiver Weg, Dimension und Art solcher Missverständnisse zu verdeutlichen. Einige werden sich immer etwas vormachen, ungeachtet der Tatsachen. Doch das sind sicherlich nicht diejenigen, die wir erreichen wollen.

Uns geht es vielmehr um die große Mehrheit der Öffentlichkeit, die offen für die Wissenschaft ist, aber schlicht nicht genug darüber weiß oder nie mit wissenschaftlicher Beweisführung konfrontiert wurde. Lassen Sie mich eine andere Frage stellen, die vielleicht noch stärkere Emotionen auslöst: Kann Wissenschaft den Glauben vertiefen oder zerstört sie ihn?

Ich kam darauf, weil ich kürzlich gebeten wurde, an einem katholischen College einen Vortrag zum Thema Wissenschaft und Religion zu halten. Ich galt offenbar als jemand, der beide Bereiche miteinander verknüpfen kann. Nach meiner Zusage fiel mir auf, dass die Veranstalter meinem Vortrag den Titel »Wissenschaft vertieft den Glauben« gegeben hatte. Nach anfänglichen Bedenken fielen mir immer mehr gute Gründe ein, den Titel genau so zu belassen.

Offenbar haben viele Leute das psychologische Bedürfnis, an eine göttliche Intelligenz zu glauben – auch ohne direkte Beweise. Ich denke auch nicht, dass wir der Menschheit je den religiösen Glauben austreiben werden, ebenso wenig wie Liebesgefühle oder andere irrationale, aber dennoch grundlegend menschliche Wesenszüge. Obwohl sie wissenschaftlicher Ratio zuwiderlaufen, sind diese dennoch real und kaum weniger wert, wenn wir unsere Menschlichkeit betrachten.

Dawkins: Solchen Pessimismus finde ich übrigens unter Rationalisten weit verbreitet, bis hin zum Masochismus. Es ist fast so, als würden Sie verkünden, die Menschheit sei für immer zur Unvernunft verdammt. Ich glaube allerdings, dass Irrationalität nichts mit Liebe, Poesie oder Emotionen, die das Leben so lebenswert machen, zu tun hat. Diese Aspekte stehen keineswegs im Widerspruch zur Rationalität. Vielleicht wird sie von ihnen tangiert. Ich akzeptiere sie natürlich, ebenso wie Sie. Positive irrationale Überzeugungen und Aberglaube sind jedoch ein völlig anderes Thema. Hinzunehmen, dass wir sie nie loswerden können – dass sie einen unverzichtbare Teil des menschlichen Wesens darstellen –, scheint für Sie und andere unmöglich zu sein. Ist die Vermutung aber nicht sehr herablassend, dass Menschen im Allgemeinen nicht in der Lage sind, sich davon zu befreien?

Krauss: Ich bin mir gar nicht so sicher, ob ich nicht selbst irrationalen Auffassungen anhänge, zumindest solchen, die mich selbst betreffen. Doch wenn religiöser Glaube ein zentraler Teil der Lebenserfahrung vieler Menschen ist, stellt sich doch gar nicht die Frage, wie wir die Welt von Gott befreien können. Vielmehr ist die Frage, wie wir mit Hilfe der Wissenschaft solche Überzeugungen zumindest relativieren und die irrationalsten und schädlichsten Auswüchse des religiösen Fundamentalismus beseitigen können. Das ist sicherlich ein Weg, wie Wissenschaft den Glauben bereichern kann.

Bei meinem Vortrag an dem katholischen College orientierte ich mich an Ihrem letzten Buch. Ich schilderte, wie wissenschaftliche Prinzipien – einschließlich der Forderung, nicht allzu selektiv bei der Auswahl der Daten zu sein – es verlangen, dass man gar keine Freiheit bei der Auswahl seiner Grundüberzeugungen hat.

Wenn jemand Homosexualität für abscheulich hält, weil dies so in der Bibel steht, muss er auch die anderen Dinge akzeptieren, die dort geschrieben stehen: etwa die Erlaubnis, eigene Kinder zu töten, wenn sie ungehorsam sind, oder die Anerkennung des Rechts einer Frau, mit dem eigenen Vater

schlafen zu dürfen, wenn man ein Kind haben möchte und keine anderen Männer da sind.

Außerdem kann Wissenschaft gefährliche wörtliche Interpretationen der Heiligen Schrift entlarven – etwa die Vorstellung, dass Frauen einfach nur Leibeigene seien, was ja allem widerspricht, was uns die Biologie über die Rolle der Frau und ihre geistigen Fähigkeiten sagt. Ähnlich, wie schon Galilei sagte: Gott hätte Menschen nicht mit Gehirnen ausgestattet, wenn er nicht gewollt hätte, dass sie diese auch zum Erkunden der Natur nutzen. Auch so kann die Wissenschaft den Glauben bereichern. Auf einen anderen Punkt verwies der Astrophysiker Carl Sagan, der auch kein gläubiger Mensch war. Er sagte in einer posthum veröffentlichten Gifford-Vorlesung von 1985 zum Thema Wissenschaft und Religion, dass gewöhnliche religiöse Wunder in der Tat zu kurzsichtig und begrenzt seien. Für einen richtigen Gott sei eine einzelne Welt viel zu klein.

Die ungeheure Dimension unseres Universums, die uns die Wissenschaft offenbart, ist weitaus großartiger. Darüber hinaus, könnte man jetzt eingedenk der neuesten Erkenntnisse in der Theoretischen Physik hinzufügen, wäre wohl auch ein einzelnes Universum noch zu winzig, wo ja manche Forscher bereits über eine Vielzahl von Universen nachdenken. Natürlich ist es etwas anderes, den Glauben zu bereichern, als ihn zu begründen, was Wissenschaft meiner Ansicht nach nicht tut.

Dawkins: Ja, mir gefallen Sagans Ansichten auch. Ich habe sie für den Buchumschlag so zusammengefasst: »War Sagan ein religiöser Mensch? Er war viel mehr. Er verließ die kleinliche, beschränkte, mittelalterliche Welt religiöser Konventionen. Er ließ die Theologen, Priester und Mullahs in ihrer engstirnigen geistigen Armut zurück, da er über das Religiöse viel größer dachte. Diese hatten ihre Mythen aus der Bronzezeit, ihren mittelalterlichen Aberglauben sowie ein kindliches Wunschdenken. Er hatte das Universum.«

Mehr kann man eigentlich gar nicht zu der Frage sagen, ob Wissenschaft den Glauben bereichern kann. Das heißt ja nicht, dass ich Glauben gutheiße.

Krauss: Zum Schluss noch die Frage: Ist Religion an sich schlecht? Ich gebe zu, dass sich meine eigene Sicht dazu über die Jahre weiterentwickelt hat, und vielleicht bin ich mit der Zeit nachsichtiger geworden. Es gibt zweifellos Hinweise, dass Religion für zahlreiche Gräueltaten verantwortlich ist; und ich habe oft gesagt, dass heutzutage niemand Flugzeuge absichtlich in Wolkenkratzer steuern würde, wenn er nicht Gott an seiner Seite wähnte. Als Wissenschaftler sehe ich meine Rolle darin zu widersprechen, wenn Menschen aus religiösen Gründen Lügen über die Welt verbreiten. Daher sollte man religiöse Empfindungen nicht mehr oder weniger respektieren als andere metaphysische Neigungen auch. Insbesondere sollte man sie aber dann nicht respektieren, wenn sie einfach falsch sind.

Mit »falsch« meine ich solche Ansichten, die in offensichtlichem Widerspruch zum empirisch Nachweisbaren stehen. Die Erde ist nicht sechstausend Jahre alt. Wir sollten also nicht den Glauben abschaffen, sondern die Ignoranz. Glaube wird nur zum Feind, wenn er durch Wissen bedroht wird.

Dawkins: Wir stimmen da wohl ziemlich gut überein. Und obwohl das Wort »Lüge« zu hart ist, da es vorsätzliche Täuschung nahelegt, bin ich keiner von denen, die moralische Argumente zu der Frage anführen, ob religiöse Überzeugungen auch korrekt sind. Ich hatte kürzlich eine TV-Debatte mit dem britischen Politiker Tony Benn. Der war früher Energieminister und bezeichnete sich als Christ.

Im Verlauf der Diskussion zeigte sich, dass er es ihm völlig egal war, ob christliche Überzeugungen wahr sind oder nicht. Seine einzige Sorge war, ob sie moralisch vertretbar sind. Er bemängelte an der Wissenschaft, dass sie keine moralischen Leitlinien liefert. Als ich einwandte, dass es in der Wissenschaft nicht um moralische Leitlinien gehe, fragte er sinngemäß, wofür dann Wissenschaft nützlich sei. Das ist ein klassisches Beispiel für ein Syndrom, das der Philosoph Daniel Dennett »Glauben an den Glauben« nannte.

Andere Menschen denken, dass die Frage, ob religiöse Überzeugungen wahr sind oder nicht, weniger wichtig sei als die Kraft der Religion als Trostspender und Sinnstifter. Wir beide haben sicher nichts dagegen, wenn Menschen dort Trost suchen, wo immer sie es möchten, und wenn sie von starken moralischen Vorstellungen geleitet werden. Doch die Frage des moralischen oder tröstenden Werts der Religion müssen wir gedanklich trennen vom wahren Wert der Religion. Ich stoße häufig auf Probleme, wenn ich versuche, gläubigen Menschen diesen Unterschied klarzumachen. Das deutet darauf hin, dass wir als wissenschaftliche Verführer noch ein langes Stück Weg vor uns haben. ◁

Eine ausführlichere Version des Gesprächs zwischen Lawrence M. Krauss und Richard Dawkins findet sich (englischsprachig) auf www.sciam.com/ontheweb.

Wir sollten nicht den Glauben abschaffen, sondern die Ignoranz

LITERATURHINWEISE

Der entzauberte Regenbogen. Wissenschaft, Aberglaube und die Kraft der Phantasie. Von Richard Dawkins. Rowohlt-Verlag, Reinbek 2002

Der Gotteswahn. Von Richard Dawkins. Ullstein-Verlag, Berlin Sept. 2007

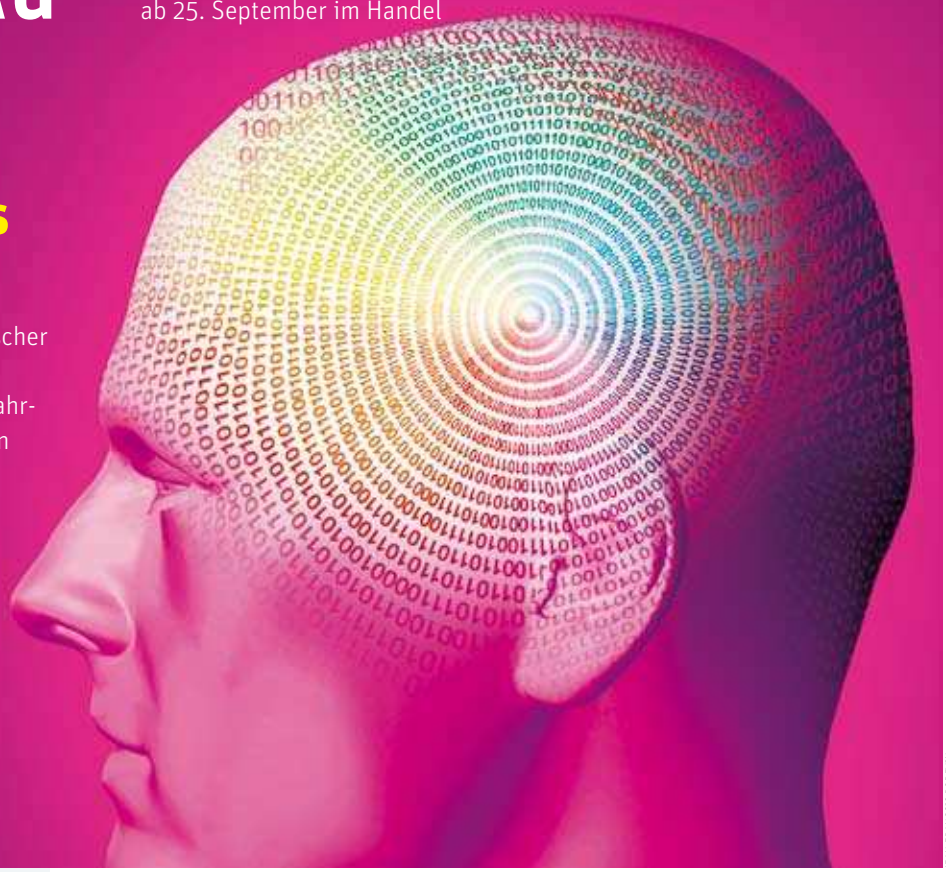
Hiding in the mirror: The quest for alternate realities, from Plato to String Theorie. Von Lawrence M. Krauss. Penguin 2006

Beyond belief: Science, religion, reason and survival. Konferenzdokumentation unter http://beyondbelief2006.org/

Webseiten der Autoren:
http://richarddawkins.net
www.phys.cwru.edu/~krauss/

VORSCHAU

Heft Oktober 2007
ab 25. September im Handel



Das Geheimnis des Gehirns

Dem Gedächtnis-Code sind Forscher schon auf der Spur. Nach demselben System könnten auch Wahrnehmung, Denken und Verhalten funktionieren

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

WEITERE THEMEN IM OKTOBER

Smarte Nanoröhrchen

Methoden der Ingenieurwissenschaften könnten der Biotechnik einen ähnlichen Schub geben wie einst der Halbleitertechnik

Chinas neue Vorgeschichte

Feinste Jade, Bronze- und Goldschmuck – Archäologen entdeckten die heiligen Stätten der bislang unbekannten Jinsha-Kultur

SLIM FILMS

Duell der Felder

Trotz ihrer ähnlichen Antworten auf die Frage, warum es Masse gibt, nahmen Kosmologen und Elementarteilchenphysiker lange Zeit kaum Notiz voneinander. Mittlerweile boomt die Mischdisziplin der Teilchenkosmologie

AP PHOTO, JOHN MCCONNICO

Klimawandel – Warum sich die Forscher so sicher sind

Im Mai erschien der Internationale Klimareport. Wir berichten über die Wissenschaft, die dahintersteht

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter